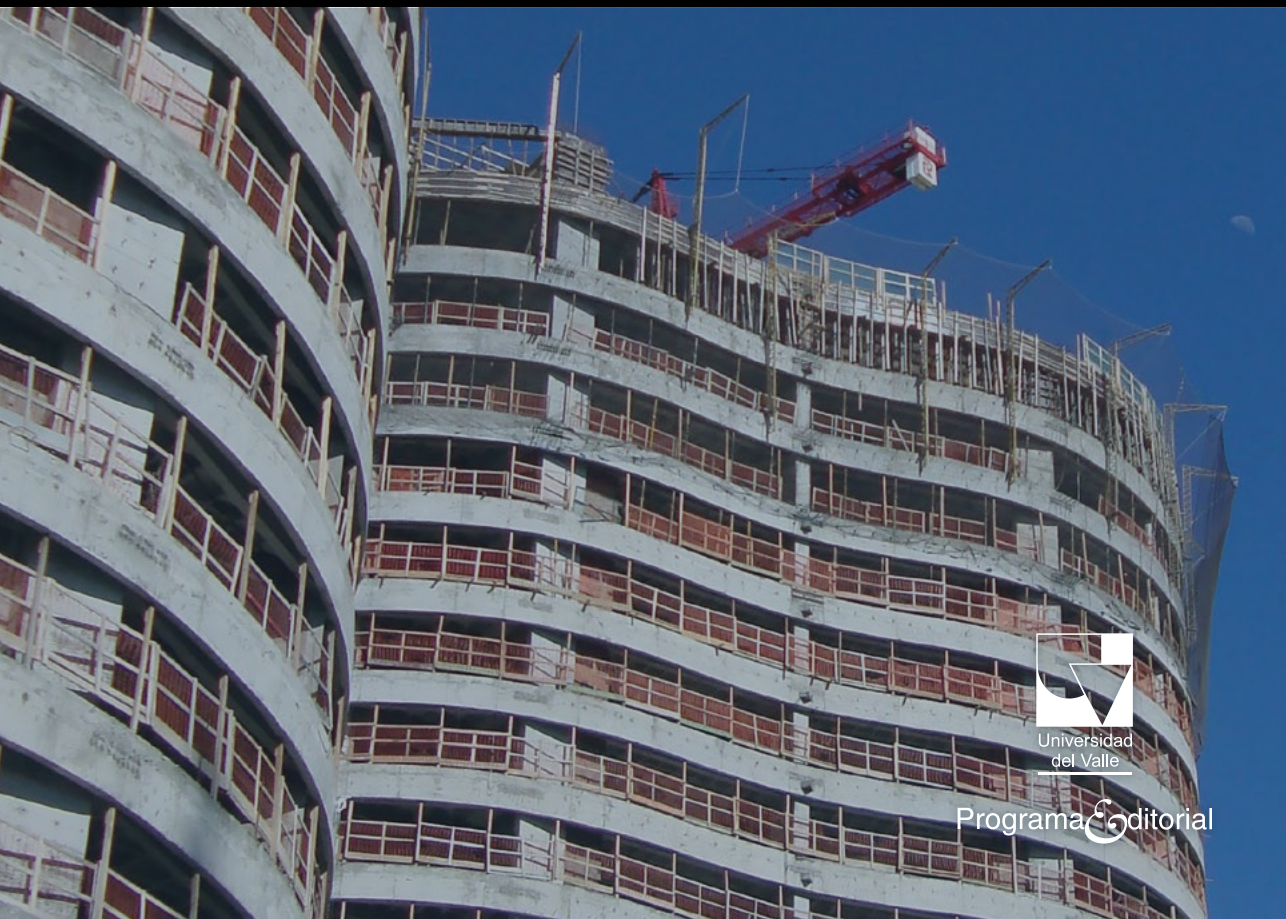


MODELO SISTÉMICO DE EVOLUCIÓN DE LEAN CONSTRUCTION SLC-EMODEL

• SANDRA LILIANA CANO MOYA •



Universidad
del Valle

Programa Editorial

MODELO SISTÉMICO DE EVOLUCIÓN DE
LEAN CONSTRUCTION
SLC-EMODEL



Colección Ingeniería

Cano Moya, Sandra Liliana
Modelo sistémico de evolución de Lean Construction, SLC-
EModel / Sandra Liliana Cano Moya.
Cali : Programa Editorial Universidad del Valle, 2021.
392 páginas ; 24 cm -- (Colección Ingeniería)
1. Lean Construction - 2. Gestión de proyectos - 3. Gestión
de producción - 4. Proyectos de construcción - 5. Modelos
de madurez - 6. Ingeniería de la construcción
690 cd 22 ed.
C227
Universidad del Valle - Biblioteca Mario Carvajal

Universidad del Valle
Programa Editorial

Título: Modelo sistémico de evolución de *Lean Construction*,
SLC-EModel

ISBN-PDF: 978-628-7500-10-5

Autora: Sandra Liliana Cano Moya

ORCID ID: 0000-0003-4257-6035

Colección: Ingeniería

Primera edición

Rector de la Universidad del Valle: Édgar Varela Barrios

Vicerrector de Investigaciones: Héctor Cadavid Ramírez

Director del Programa Editorial: Francisco Ramírez Potes

© Universidad del Valle

© Sandra Liliana Cano Moya

Diseño de carátula y diagramación: Alejandro Soto Perez.

Corrección de estilo: Pacifico Abella Millán

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad del Valle, ni genera responsabilidad frente a terceros. El autor es el responsable del respeto a los derechos de autor y del material contenido en la publicación, razón por la cual la Universidad no puede asumir ninguna responsabilidad en caso de omisiones o errores.



Cali, Colombia, julio de 2021

MODELO SISTÉMICO DE EVOLUCIÓN DE
LEAN CONSTRUCTION
SLC-EMODEL

• **SANDRA LILIANA CANO MOYA** •



Colección Ingeniería

CONTENIDO

PANORAMA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	11
ESTRUCTURA DEL LIBRO	13
Capítulo 1. Introducción al proceso de investigación	13
Capítulo 2. Lean en el sector de la construcción.	13
Capítulo 3. La madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	13
Capítulo 4. Identificación de la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	14
Capítulo 5. Modelo de evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	14
Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	14
PRODUCCIÓN ACADÉMICA	15
Artículos en revistas de investigación	15
Artículos en conferencias internacionales referenciadas en las actas y memoria	15
Trabajo de profundización, Maestría en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Civil, Orientación Construcciones.	17
Trabajos de grado de pregrado	17
Estancias de investigación	17
RESUMEN	19
CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	23
Introducción	24
Motivación para la investigación	25
El problema de investigación	25
Exploración y definición del tema de investigación	27
Preguntas de investigación.	29
Propósito de la investigación.	29
Objetivos de investigación.	29
Contribución al conocimiento	30
Originalidad de la investigación	32

Design Science Research (DSR)	33
Metodología de la investigación realizada.	41

CAPÍTULO 2

LA PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y SU

RELACIÓN CON LEAN CONSTRUCTION.	63
La gestión de producción de proyectos de construcción.	65
Metodologías de gestión de proyectos de construcción	68
Entornos de producción	70
El sistema de producción de proyectos de construcción: flujo secuencial de actividades acompasado por la unidad de producción	73
El desarrollo tradicional del proyecto de construcción	76
Integración de Lean en la producción de proyectos de construcción	79
El proceso correcto producirá los resultados correctos	83
Cultura. Desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas con enfoque en el cliente	97
Tecnología. Utilización e innovación en el uso de la tecnología para la gestión y mejoramiento de la producción	99
La importancia de la fase I: Desarrollo del producto. Planificación del proyecto constructivo	113
Evaluación del desempeño de Lean Construction	116
Trabajos relacionados	117
Resultados. Extracción de la información	118
Identificación de herramientas para evaluar LC	118
Identificación de otras herramientas o artefactos que potencialmente se utilicen en la evaluación de otros aspectos de la implementación de LC	120
Relación de las metodologías de investigación utilizadas en el desarrollo de iniciativas de evaluación de LC	121

CAPÍTULO 3

LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN

DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN	123
Implementación de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	124
La madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	137

CAPÍTULO 4

**IDENTIFICACIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION
EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE**

CONSTRUCCIÓN	159
Identificación de los elementos asociados con la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	160
Modelo de ecuaciones estructurales aplicado a la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción	165
Identificación de las relaciones de madurez de Lean Construction en la	

gestión de producción de proyectos de construcción	188
--	-----

CAPÍTULO 5

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

SLC-EMODEL	201
Estructura del modelo de evolución de madurez de Lean Construction en la gestión de proyectos de construcción (SLC-EModel)	202
Modelo de madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-MM)	203
Estrategia de evolución de la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-ES).	223
CONCLUSIONES	239
Conclusiones generales	239
Definiciones propuestas en el desarrollo de la investigación	240
Conclusiones sobre los aspectos relacionados con la producción Lean de proyectos de construcción	242
Conclusiones sobre las preguntas de investigación	245
Conclusiones sobre el logro de los objetivos	245
Conclusiones sobre la estrategia de evolución.	246
Conclusiones metodológicas.	247
Consideraciones finales	248
RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA USAR EL SLC-EMODEL	249
TRABAJOS FUTUROS	251
REFERENCIAS	255
ANEXOS.	277

ANEXO 4.1

MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES PARA EL ESTUDIO DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN

DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN	279
Modelos de ecuaciones estructurales	279
Instrumento para recolección de información	288
Validación racional.	289
Valores perdidos y valores fuera del rango	291
Especificación del modelo	291
Selección de variables observadas para conformar las variables latentes	294
Creación del modelo en ecuaciones estructurales	295
Estimación de parámetros	297
Identificación del modelo	297
Puntos clave	308

ANEXO 4.2	
CARGAS FACTORIALES DE LOS ATRIBUTOS DE MADUREZ	
QUE EXPLICAN LOS FACTORES DE MADUREZ	309

ANEXO 4.3	
VALIDEZ DE LA INFORMACIÓN PARA LOS FACTORES	
DE MADUREZ	311
R-cuadrada y R-cuadrada ajustada.	312
Confiabilidad compuesta y alpha de cronbach.	312
Varianza promedio extraída, AVE	313
Correlaciones entre factores y errores	313
Colinealidad completa, VIF	315
Factores de inflación de varianza de bloque	316
El coeficiente Q-cuadrado	317
Asimetría / kurtosis	317

ANEXO 4.4	
ÍNDICES DE AJUSTE Y CALIDAD DEL MODELO	323
Valor P	323
Prueba de hipótesis.	324
Intervalo de confianza	325

ANEXO 4.5	
RELACIONES DIRECTAS E INDIRECTAS ENTRE LOS FACTORES	
DE MADUREZ	329
Relaciones directas entre los factores de madurez.	329

ANEXO 4.5A	
EFFECTOS INDIRECTOS ENTRE LOS FACTORES DE MADUREZ. . . .	359
Efectos indirectos para rutas de dos segmentos	359

PANORAMA GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

El presente libro sustenta una herramienta original y validada para medir el estado actual de la madurez de Lean Construction (LC) en la gestión de producción de proyectos de construcción (GPC). Proporciona una estrategia de evolución, que obedece a las condiciones de madurez evaluadas, para direccionar acciones precisas para avanzar hacia el siguiente nivel de madurez. Realiza aportes significativos, tanto metodológicos y conceptuales como prácticos, al conocimiento, en términos de la madurez y evolución de LC en la GPC. De tal manera que las organizaciones de construcción cuentan con una herramienta de autoevaluación que contribuye a obtener una mejor comprensión del fenómeno de madurez de LC y, con su uso, a que todas las personas en la organización se integren como agentes de cambio.

El modelo de evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-EModel) es una forma de evaluación organizacional que responde a la necesidad del corporativo no solo de conocer el estado de la implementación de LC en la GPC, sino de establecer acciones precisas de mejoramiento que conduzcan al alcance progresivo de la madurez. El modelo se presenta como un artefacto útil que responde a la necesidad de resolver un problema de la vida real en el campo específico de la producción de proyectos de construcción que integran LC en su gestión.

El propósito de la investigación que soporta este libro fue disponer de una herramienta que permita medir la madurez del estado actual de LC y especificar un estado futuro alcanzable de manera sistemática y en términos reales. Se prevé que mejorar la eficiencia del proyecto de construcción tiene un efecto positivo en la mejora de la productividad del sector. Esta solución se logra con el uso de una metodología de investigación que combina métodos cualitativos y cuantitativos para obtener y sistematizar el conocimiento de expertos. Desarrolla un ciclo de investigación con el cual se demuestra la validez de la investigación de manera integral. El SLC-EModel está

compuesto de tres artefactos: un *modelo de madurez* (SLC-MM) con tres categorías, siete factores de madurez (FM) y 35 atributos de madurez, un *modelo de calificación* (SLC-QM) el cual contiene la formulación para obtener siete índices locales de madurez (ILM), uno por cada FM, y un índice global de madurez (IGM) con el cual se califica la madurez de LC en la GPC y finalmente, la *estrategia de evolución* (SLC-SM).

El modelo desarrollado tiene su origen en la necesidad de estudiar la madurez y proponer estrategias de evolución de LC en la GPC, sin embargo, resulta ser un modelo genérico que puede ser aplicado a cualquier sector, tanto de manufactura como de servicios. Los FM reconocen la configuración de un proceso de producción definido por tres categorías: las *personas*, el *sistema de producción* y el *soporte que la organización ofrece a la producción*.

Un trabajo posterior abordará la construcción de la herramienta de evaluación de las características de madurez del SLC-MM para su aplicación en campo; esta herramienta se denomina *herramienta de evaluación de las características de madurez* (SLC-MAET).

ESTRUCTURA DEL LIBRO

Este libro se desarrolla en cinco capítulos y un apartado específico que presenta las conclusiones y recomendaciones, y compila las referencias utilizadas en la investigación. Otros elementos que la complementan se han integrado en sus anexos.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se presentan la formulación de la investigación y la metodología utilizada para desarrollar las actividades que permitan el logro de los objetivos y la metodología de investigación.

CAPÍTULO 2. LEAN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se presentan conceptos relacionados con la producción del proyecto de construcción, se integran aspectos de producción y Lean Construction. Se presenta información extraída del artículo publicado en la revista *Espacios*, en 2017, sobre la identificación de herramientas de evaluación de la madurez de LC.

CAPÍTULO 3. LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se desarrolla el primer objetivo específico. El capítulo consta de tres secciones: (a) implementación de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción, (b) la madurez de Lean

Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción y (c) los modelos de madurez como herramientas de mejoramiento.

CAPÍTULO 4. IDENTIFICACIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se presenta el desarrollo del SLC-EModel desde la identificación de los elementos asociados con la madurez, la construcción del modelo de ecuaciones estructurales (Structural Equation Modeling [SEM], por su sigla en inglés). Se presentan los índices locales de madurez (ILM), el índice global de madurez (IGM) y los perfiles con los que se conduce la estrategia de evolución (SLC-ES). Este capítulo desarrolla el segundo objetivo específico.

CAPÍTULO 5. MODELO DE EVOLUCIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Este capítulo despliega el desarrollo del modelo de evolución de la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción, el cual se compone de un modelo de madurez y una estrategia para alcanzar el siguiente nivel de madurez. En este capítulo se desarrolla el tercer objetivo específico.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se presentan las principales características de la investigación. De igual manera, se ofrece una serie de recomendaciones tanto para el uso del modelo en investigaciones futuras como para que profesionales con conocimiento y experiencia en Lean o LC puedan adaptar el modelo a la gestión de producción de proyectos de construcción de la organización.

PRODUCCIÓN ACADÉMICA

Durante el desarrollo de la investigación y del doctorado que la soportó, se presentaron resultados de investigación para difundirlos entre la comunidad académica y profesional. De igual manera, de la investigación realizada se derivaron trabajos de grado de estudiantes de pregrado y un trabajo de investigación de un estudiante de maestría. La investigadora realizó cinco estancias de investigación en cuatro universidades, una nacional y tres internacionales.

ARTÍCULOS EN REVISTAS DE INVESTIGACIÓN

- Cano, S. y Rubiano, O. (2015). Modelo dinámico para evaluar el flujo de la gestión de proyectos de construcción: estudio de caso en infraestructura universitaria pública. *Heurística*, 17, 21-33.
- Cano, S., Botero, L. y Rivera, L. (2017). Evaluación del desempeño de Lean Construction. *Espacios*, 38(39), 30.

ARTÍCULOS EN CONFERENCIAS INTERNACIONALES REFERENCIADAS EN LAS ACTAS Y MEMORIA

- Cano, S. y Rubiano, O. (2015, noviembre 6-8). *Estudio de factores que inciden en el flujo de la gestión de ejecución de proyectos de construcción de infraestructura universitaria* [ponencia]. XI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas. Universidad de Monterrey, Monterrey, México.
- Cano, S., Delgado, J., Botero, L., y Rubiano, O. (2015, julio 29-31). *Barriers and success factors in Lean Construction's. Survey in pilot context* [Paper presentation]. 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC23, Perth, Australia.

- Cano, S., Fajardo, M., Botero, L. y Rivera, L. (2015, octubre 7-9). *Entornos y sistemas de producción en construcción. Relación con la evolución de la aplicación de Lean Construction en Colombia* [ponencia]. 9º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, Inovação e Sustentabilidade (Sibragec 2015) y 6º Encontro Latino Americano de Gestão e Economia da Construção (Elagec 2015), Sibragec-Elagec 2015. Universidad de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Cano, S., Delgado, J., Botero, L. y Rivera, L. (2015, octubre 7-9). *Barreras y factores de éxito que impactan la implementación de Lean Construction* [ponencia]. 9º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, Inovação e Sustentabilidade (Sibragec 2015) y 6º Encontro Latino Americano de Gestão e Economia da Construção (Elagec 2015), Sibragec-Elagec 2015, Universidad de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Cano, S. y Rivera, L. (2015, octubre 7-9). *Modelo sistémico de la madurez en la aplicación de Lean en la gestión de proyectos de construcción* [ponencia]. 9º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, Inovação e Sustentabilidade (Sibragec 2015) y 6º Encontro Latino Americano de Gestão e Economia da Construção (Elagec 2015), Sibragec-Elagec 2015, Universidad de São Carlos, São Carlos, Brasil.
- Cano, S., Casanova, A. y Rivera, L. (2016, agosto 24, 25, 26). *Last Planner System en la planeación y control del proyecto de construcción* [ponencia]. III Congreso Internacional de Industria y Organizaciones “Gestión de cadenas de abastecimiento en un mundo cambiante”, Santiago de Cali, Colombia.
- Cano, S., Erazo, D., Rivera, L. y Botero, L. (2016, noviembre 15-18). *Exploración de la aplicación de la filosofía Lean Construction en empresas constructoras colombianas* [ponencia]. 7.º Encuentro Latinoamericano de Economía y Gestión de la Construcción (VII Elagec) y 2.º Seminario Internacional de Innovación en Gestión de la construcción (II Seinco), “Nuevas tendencias en la construcción sostenible”, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Mano, A., Gouvea da Costa, S., Pinheiro de Lima, E., y Cano, S. (2018, julio 17-19). *Use of the Lawshe Technique to Validate the Questionnaire Items on Barriers that Impede the Implementation of Lean Construction* [Paper presentation]. The 9th International Conference on Production Research – ICPR Americas 2018, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Cano, S., Botero, L., García-Alcaraz, L., Tovar, R. and Rivera, L. (2020, julio 6-10). *Key aspects of maturity assessment in Lean Construction*. 28th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC28, Berkeley, CA, Estados Unidos.

TRABAJO DE PROFUNDIZACIÓN, MAESTRÍA EN INGENIERÍA, ÉNFASIS EN INGENIERÍA CIVIL, ORIENTACIÓN CONSTRUCCIONES

Bonilla, A. (2017). *Estudio de la variabilidad en la implementación del Last Planner System (LPS) en proyectos que adoptan la herramienta por primera vez* [Tesis de Maestría no publicada]. Universidad del Valle.

TRABAJOS DE GRADO DE PREGRADO

Delgado, J. (2015). *Identificación preliminar de factores críticos en la implementación de la filosofía Lean Construction en proyectos de construcción en Colombia* [Trabajo de grado]. Universidad del Valle.

Escobar, L. M. y Pérez, E. I. (2015). Caracterización de los entornos y sistemas de producción de proyectos de construcción de edificaciones en Colombia y su relación con la aplicación de Lean Construction (Trabajo de grado Ingeniería Industrial). Universidad del Valle.

Erazo, A. D. (2018). *Estado de la aplicación de Lean Construction en empresas constructoras en Colombia* [Trabajo de grado no publicado]. Universidad del Valle.

Buchelli, A. A. (2019). *Uso de redes neuronales artificiales para la evaluación de Lean Construction en la gestión de proyectos de construcción* [Trabajo de grado no publicado]. Universidad del Valle. (Distinción: Tesis Laureada).

Gonzalez, L. E. (2019). *Evaluación no lineal de la madurez de Lean Construction utilizando redes neuronales artificiales*. [Trabajo de grado no publicado]. Universidad del Valle. (Distinción: Tesis laureada).

ESTANCIAS DE INVESTIGACIÓN

Universidad Eafit, Medellín, Colombia. Grupo de Investigación en Gestión de la Construcción (Gescon). Del 20 de julio de 2014 al 30 de junio de 2015.

Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile. Centro de Excelencia en Gestión de la Producción (Gepuc). Del 6 de abril al 5 de mayo de 2015.

Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile. Centro de Excelencia en Gestión de la Producción (Gepuc). Del 19 de septiembre al 7 de octubre de 2016.

Universidad Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (Norie). Del 10 al 29 de octubre de 2016.

Pontificia Universidad Católica de Perú, Lima, Perú. Grupo de Gestión y Tecnología en la Construcción de Edificaciones y Obras Civiles (Getec). Del 21 de noviembre al 16 de diciembre de 2016.

RESUMEN

Lean Construction (LC) se propone como un sistema de gestión de producción de proyectos de construcción que se propone la mejora de la eficiencia en ellos. Su utilización propicia la reducción del desperdicio de materiales, tiempo y esfuerzo en todas las fases del proyecto para cumplir eficazmente con la oferta de valor. La integración de LC en la gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) es un proceso sistemático, susceptible de ser evaluado para conocer la capacidad del sistema para el cumplimiento de la oferta de valor. En este sentido, en el ámbito investigativo se evidencian el desarrollo y la adaptación de algunas herramientas para evaluar el nivel de avance de la madurez de LC en organizaciones de construcción. Sin embargo, la mayoría de ellas se enfocan en la etapa de construcción, y pocas en otras fases del proyecto; adicionalmente, no se evidencia la existencia de herramientas que apoyen la evolución de LC hacia niveles superiores de madurez.

El propósito de la investigación que recoge este libro ha sido entregar a la industria de la construcción una herramienta que evalúe el nivel de madurez de LC en la GPC y que oriente con precisión las acciones necesarias para alcanzar un mayor nivel de madurez LC para evolucionar. La evolución implica intervenir el sistema de producción de proyectos de construcción (SPPC) para mejorar su eficiencia para el cumplimiento de la oferta de valor de manera continua. Para cumplir con el propósito mencionado, se diseña un modelo de evolución de LC en la GPC, se caracteriza la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean, se escogen los elementos involucrados en la madurez y se identifican las relaciones entre ellos para estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC, y se desarrolla una herramienta de evaluación de madurez de LC en la GPC que permita conocer el nivel actual de madurez para orientar su evolución hacia niveles superiores.

El modelo de evolución de LC en la GPC (SLC-EModel) es un método de evaluación organizacional enfocado en la gestión de producción del proyecto de construcción. Este método responde a la necesidad del corporativo de conocer el nivel de alcance de la madurez de LC en la GPC y de establecer acciones precisas de mejoramiento que conduzcan al alcance progresivo de dicha madurez. Un modelo de este tipo es considerado como un artefacto útil que responde a la necesidad de resolver un problema de la vida real en el campo específico de la producción de proyectos de construcción que hacen uso de LC para su gestión de producción.

La metodología utilizada en la investigación adelantada fue constructivista y se abordó como una combinación de métodos y herramientas de investigación cualitativa y cuantitativa. De esta manera, se entiende con más precisión la problemática a estudiar y la complejidad del fenómeno de madurez para el desarrollo del modelo. Con el uso de esta metodología se propone un conjunto de definiciones como aporte al conocimiento. Los conceptos desarrollados en la investigación se basan en el conocimiento extraído de manera sistemática de los expertos consultados a lo largo de ella.

El valor de dicha investigación reside en la identificación de los elementos clave involucrados en la madurez de LC en la GPC y las relaciones entre ellos, conformados como un sistema. El resultado es el modelo de evolución de LC en la GPC, el SLC-EModel, con el cual se evalúa la madurez de los elementos responsables de ella, a la vez que confirma la naturaleza sistémica de la implementación de Lean. La investigación ofrece como resultado una estrategia de evolución para llevar a la GPC hacia un mayor nivel de madurez al utilizar LC como sistema de gestión de la producción.

Se han precisado las características que se deben apreciar en un proceso de madurez de LC en la GPC con las cuales se obtiene el modelo de evolución validado. Este modelo contiene elementos identificados como responsables de la madurez. Estos elementos se agrupan en atributos, los cuales explican los factores de madurez y estos, a su vez, constituyen las categorías. La investigación permitió identificar las relaciones entre los elementos responsables de la madurez para desarrollar el SLC-EModel, el cual es validado con rigurosidad en cada paso de su construcción.

El aporte al conocimiento se materializa en disponer de una herramienta validada en forma de un modelo de aplicación de LC en la GPC. El modelo se compone de tres herramientas:

- a. un modelo de evaluación de madurez (SLC-MM) que cuenta con tres categorías, siete factores de madurez (FM) y 35 atributos de madurez;
- b. un modelo de calificación (SLC-QM), el cual contiene la formulación para obtener siete índices locales de madurez (ILM), uno por cada

FM, y un índice global de madurez (IGM), con el cual se califica la madurez de LC en la GPC;

c. la estrategia de evolución (SLC-SM).

Los factores de madurez reconocen la configuración de un proceso de producción de manera genérica, un sistema de producción definido por tres categorías:

a. Personas

b. Sistema de producción

c. Soporte que la organización ofrece a la producción.

Otro de los aportes de la investigación corresponde a que este modelo resulta ser genérico y puede ser adaptado y aplicado a otros sectores tanto de manufactura como de servicios.

INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

RESUMEN

En este capítulo se presentan los aspectos que condujeron la investigación en el marco de una metodología de investigación apropiada para la gestión de producción de proyectos de construcción. En la formulación de la investigación se sustenta la problemática que la hace relevante para ser objeto de investigación, se formulan las preguntas de investigación que dieron paso a los objetivos, se hace referencia a antecedentes relevantes y al estado del arte, en términos de investigaciones orientadas a este interés, y se presentan las actividades previstas para el cumplimiento de los objetivos. De otra parte, se describen los aportes de la investigación y los aspectos que sustentan su originalidad.

Definiciones

Para un mejor entendimiento de los aspectos principales de la investigación, se presentan a continuación dos definiciones propuestas. Estas, más adelante, se retomarán para explicar su formulación y su importancia para esta investigación.

Definición de la madurez

Es aquel estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. Es un estado que se va alcanzando paulatinamente al transitar por diferentes niveles de madurez que permiten escalar hacia un estándar máximo, un nivel de excelencia de referencia para el contexto, un “Gold Standard” (Cano y Rivera, 2015).

Definición para Lean Construction

Lean Construction es un sistema de gestión de la producción de proyectos de construcción cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la oferta de valor por medio de: (a) la aplicación de los principios de la producción Lean en la industria de la construcción, (b) el desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas, con enfoque en el cliente, y de autoevaluación permanente y (c) la utilización e innovación de la tecnología para la gestión y mejoramiento continuo de la producción.

INTRODUCCIÓN

Las organizaciones de construcción desarrollan su actividad productiva a partir de proyectos; sin embargo, esta investigación se centra en el proceso de GPC y no en la organización. El objetivo es la mejora del desempeño de la implementación de LC de manera integral. De esta manera, el sujeto de estudio es la GPC, y la organización se integra como el facilitador de la producción con sus procesos de apoyo.

La GPC articula los elementos relacionados con la producción de proyectos de construcción en busca de los mejores resultados del negocio e integra a LC con el propósito de hacer más eficiente el proceso para que el negocio de construcción sea más rentable. Es por ello que esta investigación abarca desde identificar los elementos relacionados con la madurez de LC en la GPC hasta proponer una estrategia de evolución de dicha madurez. En este sentido, un mayor nivel de madurez supone mejoras en la eficiencia del sistema de producción.

En la medida en que el proceso de GPC madura, se evidencian en el proyecto mejoras sistemáticas. La GPC debe permitir la integración de enfoques que lleven a mejoras globales a partir de la mejora de cada uno de los componentes del sistema. Es entonces que LC se presenta como uno de esos enfoques de mejora. El interés es identificar el nivel de madurez de LC en la GPC y proponer la manera de ir hacia uno superior.

La madurez de LC es un tema de interés académico muy reciente y la literatura aún es escasa. A partir del 2014, las empresas de construcción interesadas en LC disponen de un primer modelo de madurez, el Lean Construction Maturity Model (LCMM) desarrollado por Nesensohn (2014) en su tesis de doctorado y presentado en un artículo de investigación por Nesensohn, Bryde, Ochieng y Fearon (2014). Este modelo se centra en la organización de construcción e incluye al proyecto de construcción como uno de sus factores, *procesos y sistemas*. Nesensohn (2014) pone a disposición de investigadores la información recolectada en su trabajo; algunos de cuyos elementos han sido integrados a la presente investigación.

MOTIVACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN

Contribuir al mejoramiento de la productividad del sector de la construcción a partir de un mejor desempeño de los proyectos.

Esta mejora de productividad puede hacer uso de una herramienta que apoye el alcance de altos niveles de eficiencia del SPPC mediante la evaluación de su estado actual de madurez. Los altos niveles de eficiencia se alcanzan en la medida que avanza hacia el mayor nivel de madurez. El propósito es la búsqueda de la mejora progresiva del SPPC integrando la filosofía Lean Construction en la GPC para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor con altos niveles de confianza.

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El problema de esta investigación fue la necesidad de disponer de una herramienta que permita conducir un proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC hacia un estado superior de madurez.

La madurez de LC es un tema de reciente interés de organizaciones e investigadores. Ante esta necesidad, hay escasa disponibilidad de herramientas para evaluar la madurez de LC. En la actualidad, se dispone de un modelo de madurez de LC con enfoque en la organización de construcción y de otras herramientas que evalúan el estado de la aplicación de prácticas en obra (Nesensohn, 2014; Hofacker *et ál.*, 2008; Vieira *et ál.*, 2012; Valente *et ál.*, 2012; Etges *et ál.*, 2013; Tezel y Nielsen, 2013 y Limón, 2015). En la revisión de la bibliografía correspondiente al alcance de esta investigación, no se identificaron herramientas específicas que direccionen la manera de alcanzar el siguiente nivel de madurez de LC.

Hasta ahora, el interés de investigadores y académicos respecto de este tema se ha centrado en la consolidación de la definición de madurez de LC y en el desarrollo de herramientas que ayuden a medirla. Se evidencia la escasa disponibilidad de artefactos o herramientas contextualizadas para evaluar el avance de la madurez de LC, así como de estrategias soportadas cuantitativamente para avanzar hacia el máximo nivel de madurez. Asimismo, no se evidencian estudios enfocados en la madurez de LC en la GPC (Cano *et ál.*, 2017).

LC fue propuesta en la industria de la construcción hace ya casi tres décadas por Koskela (1992). Este autor estudió el desarrollo de Lean en manufactura, lo que le permitió proponer su aplicación en construcción con una estrategia de mejoramiento de la productividad en este sector. Este me-

joramiento debería ser evaluado de manera sistémica para identificar efectivamente los puntos de intervención en el SPPC. Como producto de la presente investigación, en el año 2017 fue publicado un artículo que realiza una revisión del estado del arte con la cual se identifican, entre otros aspectos, el aumento de las publicaciones y la diversidad de los temas relacionados con LC (Cano *et ál.*, 2017).

Autores como Aziz y Hafez (2013) sustentan que los proyectos desarrollados con apoyo en LC son más fáciles de gestionar, permiten el planteamiento de objetivos claros y alcanzables según las expectativas del cliente, con mejor desempeño de la seguridad en la construcción, cuestan menos, aumentan la confiabilidad en los compromisos de entrega, y se percibe en ellos una notable mejora en la calidad del producto final. Estas cualidades, entre otras, vienen posicionando a LC como una estrategia de gestión de rápido crecimiento en su uso, lo que se evidencia en la mejora de la productividad para el sector (Sage, Dainty y Brookes, 2012). Según estos autores, se parte de algunas consideraciones:

- la implementación de LC en la producción de proyectos de construcción mejora la eficiencia del proyecto,
- un mayor nivel de madurez en LC contribuye a la mejora de la eficiencia del SPPC,
- la mejora de la eficiencia influye directamente en el mejoramiento de la producción y en el cumplimiento de la oferta de valor con altos estándares,
- la mejora de la producción influye directamente en el mejoramiento de la productividad de la organización,
- la mejora de la productividad de la organización contribuye al mejoramiento de la productividad del sector.

La implementación de LC es un proceso sistemático (Gao y Low, 2014) y requiere identificar las condiciones y las acciones adecuadas para obtener el mayor provecho de su utilización. Por lo tanto, es conveniente conocer el nivel de impacto de dicha implementación en el SPPC y proponer acciones que promuevan un avance hacia un nivel superior. Esta investigación supone que un mejor sistema de producción aumenta la confiabilidad en el cumplimiento de la oferta de valor, por lo cual, la autora propone la siguiente definición del “cumplimiento de la oferta de valor” como eje para su desarrollo.

Definición del cumplimiento de la oferta de valor

Es la materialización de los requerimientos del cliente, al integrarlos al producto o servicio, en su fabricación o desarrollo, luego de ajustar el sistema de producción a una adecuada interpretación de las expectativas del cliente.

Para conocer el estado de LC en la GPC, se requiere de un artefacto o herramienta de evaluación, como el modelo de madurez (MM), el cual permite identificar el alcance progresivo de la madurez de la GPC con respecto a un estándar. Una vez identificado el nivel de madurez, se establece la brecha entre el estado actual y el estándar, con la cual se proponen acciones para el avance hacia un mayor nivel de madurez.

En el ámbito académico están disponibles algunas iniciativas para evaluar la implementación de LC, como la de Hofacker *et ál.* (2008) y la de Etges, Saurin y Bulhões (2013), que han sido aplicadas a organizaciones de construcción en Alemania y Brasil; y el modelo de madurez con enfoque en las organizaciones de construcción de Nesensohn (2014, 2017). No se identifican estrategias estandarizadas para avanzar al siguiente nivel de madurez. La acción más común es proponer planes de mejoramiento basados en la evaluación con el uso de estas iniciativas de evaluación (Cano, Botero y Rivera, 2017).

Diekmann, Krewedl, Balonick, Stewart y Won (2004) presentan recomendaciones y propuestas para realizar una exitosa implementación de LC en organizaciones de construcción. Las cuales se basan en la incorporación de estudios del movimiento de trabajadores, similares a los estudios realizados por ingenieros industriales y analistas de operaciones en manufactura, respaldando el hecho de que “la productividad en las operaciones de construcción puede mejorarse y que hay muchas herramientas, técnicas y métodos creativos que lo demuestran” (Salem y Zimmer, 2005, p. 53).

EXPLORACIÓN Y DEFINICIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

El proyecto de construcción es un sistema de relaciones entre los elementos involucrados con la madurez; de esta manera, la evolución hacia mayores niveles de madurez debería implicar mayores niveles de eficiencia como una propiedad emergente del sistema. Con este supuesto, adquiere importancia disponer de una herramienta “apropiada” que evalúe la madurez y dirija la forma de alcanzar niveles superiores de madurez de acuerdo con las relaciones identificadas entre los elementos del sistema. Entonces, sobre la eficacia de la implementación de LC como una estrategia para mejorar

la eficiencia del sector de construcción, surgen diversos cuestionamientos, tales como:

- ¿Cómo pueden conocer las empresas de construcción que se está realizando una adecuada implementación de LC?
- ¿La implementación de LC que ellas realizan contribuye a mejorar la eficiencia del proyecto?
- ¿Cómo se logra mejorar la eficiencia del proyecto con la implementación de LC?
- ¿La implementación de LC contribuye efectivamente a la mejora de la oferta de valor, y de qué manera?
- ¿La mejora en la oferta de valor es una consecuencia de la mejora del sistema de producción debido a la implementación de LC?

Para considerar estos cuestionamientos, luego de una investigación inicial del estado del arte, se estableció como tema de interés la evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción. Este interés se enfoca en el diseño de un artefacto que ayude a direccionar acciones de evolución de la madurez de LC en la GPC a partir de la evaluación de la madurez actual.

Ante el interés de obtener una cada vez mejor oferta de valor en la GPC, LC se propone como una estrategia de gestión apropiada para ser aplicada en el logro de este propósito con enfoque en el cumplimiento de la oferta de valor. Al respecto, Koskela (2000) sostiene que: “Para mejorar efectivamente la construcción mediante la aplicación de los nuevos conceptos, es necesario que las disciplinas de ingeniería y gestión de la construcción se reintegren con disciplinas genéricas centradas en operaciones, diseño, producción y proyectos” (p. 252); sin embargo, la implementación se enfrenta con múltiples retos, entre ellos: lograr el cambio de paradigma, vencer la resistencia al cambio, lograr el reconocimiento del concepto de madurez y entender los beneficios de contar con un proceso maduro.

En este mismo sentido, un nivel básico de madurez debería ser el vehículo para que una organización que se interese por una transformación LC identifique la mejor forma de iniciar la implementación de LC. Para contar con un MM, se requiere identificar los elementos involucrados con la madurez y revelar las relaciones entre ellos. Esta investigación parte de suponer que la madurez de LC en la GPC se obtiene de la madurez de los elementos involucrados en el mejoramiento del SPPC y la producción misma.

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Luego de identificar el problema de investigación y de revisar trabajos relacionados con la evaluación de madurez de LC (Capítulo 2), se plantearon las preguntas de investigación que orientaron la definición de sus objetivos (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Preguntas que conducen la investigación

Pregunta principal	Preguntas complementarias
¿Cómo se pueden establecer estrategias de evolución de LC en la GPC para alcanzar un mayor nivel de madurez en LC?	¿Qué caracteriza la madurez de LC en la GPC?
	¿Qué elementos, que ya son conocidos, deben ser considerados para la construcción de un modelo de evolución de LC en la GPC?
	¿Cómo es la adaptación de un sistema o herramienta de evaluación de la madurez de LC en la GPC?
	¿Qué características tienen los perfiles asociados a los niveles de madurez de LC en la GPC?
	¿Cuáles deben ser las acciones que conduzcan a mejorar continuamente la madurez de LC en la GPC?

PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

Diseñar un modelo que dirija las acciones de evolución de LC en la GPC. Acciones que contribuyan a alcanzar sistemáticamente un mayor nivel de madurez, después de evaluar el nivel actual. Esta evolución implica la intervención al SPPC con el fin de mejorar su eficiencia y el cumplimiento de la oferta de valor de manera continua.

OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

Objetivo general

Diseñar un modelo de evolución de la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción.

Objetivos específicos

- Precisar las características de la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean.

- Escoger los elementos involucrados en la madurez que conduzcan a estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC e identificar las relaciones entre ellos.
- Desarrollar una herramienta de evaluación de madurez de LC en la GPC que permita conocer el nivel actual para orientar su evolución hacia niveles superiores de madurez.

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO

Los resultados de la investigación se consolidan en una contribución teórica, una práctica y una metodología.

Contribución teórica

En esta investigación se construyó un símil entre los entornos de producción de proyectos de construcción y la producción en manufactura. Presenta el sistema de producción del proyecto de construcción como un flujo secuencial de actividades acompasado por la unidad de producción. De igual manera, muestra las diferencias entre la implementación de Lean en una empresa de construcción y una organización de manufactura, o una de servicios que no sea de construcción.

A lo largo de la investigación se propusieron definiciones de acuerdo con las temáticas abordadas. Estas definiciones pretenden contribuir a llenar un vacío en la literatura y soportaron el desarrollo de la investigación, y son: cumplimiento de la oferta de valor, Lean Construction como un sistema de producción y modelo de madurez de LC en la GPC.

El uso del modelo prevé una mejor comprensión de la manera de realizar una implementación más precisa de LC en la GPC a partir del entendimiento de las condiciones iniciales de una organización que empieza su camino LC. Así, se consigue una mejor comprensión de la forma de identificar la madurez de LC en la GPC.

Esta investigación también provee del entendimiento de que el proceso de producción de proyectos de construcción, así como otras actividades productivas, pueden ser desarrolladas a partir de tres categorías: *personas, sistema de producción y soporte de la organización al proceso de producción*. De esta manera se identifican con mayor precisión los elementos asociados con la madurez de cada una de estas categorías, como son los factores de madurez y los atributos de madurez.

La obtención de un modelo genérico, que puede ser adaptado y utilizado en otros sectores a partir de un modelo desarrollado con un interés específico, tiene un contenido teórico importante que lo hace versátil para su uso en diferentes contextos de producción. Esto se basa en la validez de las relaciones identificadas entre los elementos de madurez que componen el modelo, la fuerza de dicha relación expresada por la influencia de un elemento en otro y los efectos que esta relación produce.

De otra parte, la conformación de los factores de madurez a partir de la agrupación de los atributos correlacionados representa con precisión conceptos reconocidos por el cuerpo académico y practicante de LC. Esta conformación surge de las correlaciones entre los atributos, las cuales se presentan a partir del conocimiento de los expertos consultados.

Contribución práctica

El principal resultado de la investigación es el modelo de evolución compuesto por un modelo de madurez y una estrategia de evolución; lo que desde el punto de vista práctico ofrece a las organizaciones de construcción una herramienta para el mejoramiento continuo de LC en la GPC, la cual también puede ser utilizada para identificar las necesidades de la organización interesada en iniciar su camino LC a partir de la evaluación de su estado inicial.

La obtención de los índices de madurez, los índices locales y el índice global de madurez, a partir de los resultados del modelo de ecuaciones estructurales (SEM, por su sigla en inglés), muestra, de manera práctica, cómo hacer uso del potencial de los resultados del SEM para futuras aplicaciones en este u otros intereses de investigación.

La utilización de los índices de madurez es una contribución práctica para calificar los elementos responsables de la madurez de LC en la GPC: atributos, factores y madurez general. Esta utilización constante y continua ofrece a la comunidad profesional y académica una forma de identificar esta madurez, lo que permite desarrollar un lenguaje común a la vez que se construye una cultura de autoevaluación permanente.

Del SLC-EModel se pueden derivar otros submodelos, los cuales subyacen en él, lo cual sugiere un potencial adicional de uso del modelo para que, con la misma evaluación de madurez, se obtengan índices equivalentes de madurez para dichos submodelos. Se pueden identificar preliminarmente submodelos como calidad, seguridad en el proyecto, desarrollo de la cultura Lean, entre otros.

El direccionamiento para la evolución que ofrece el SLC-EModel reconoce diversas posibilidades para alcanzar el siguiente nivel de madurez de-

finido por la alta dirección. Es la alta dirección que, con el reconocimiento de las condiciones y posibilidades reales de evolución, brinda las condiciones para acercarse al nivel de madurez objetivo.

Es un aporte práctico el contar con un modelo que incorpora las características propias e intrínsecas de la construcción, y LC en una estrategia de mejoramiento de la eficiencia de los proyectos de construcción. Esta investigación y el SLC-EModel contribuyen a desarrollar capacidad organizacional de autoevaluación y autogestión en todos los niveles de la organización, lo cual aporta a la evolución del proceso de GPC.

Contribución metodológica

Este proceso de investigación utilizó métodos cualitativos y cuantitativos, con los cuales se obtuvo la información. Asimismo, se desarrolló de manera sistemática, dando lugar a un protocolo con el cual la investigación puede ser reproducida en diferentes contextos y entornos de producción.

Una contribución valiosa de la investigación ha sido la obtención de información de expertos LC, la cual, luego de ser integrada al estudio, ofrece resultados que se revierten en beneficio de la evolución de LC en la GPC.

Esta investigación adaptó una metodología para el mapeo de referencias bibliográficas, tomando como base elementos del trabajo de mapeo sistemático de referencias bibliográficas en temas de gestión de la construcción de Wendler, (2012) y (Ramirez, 2009).

De igual manera, es una contribución el desarrollo de la metodología para construir el SEM aplicado a LC en la GPC, que puede ser reproducida para otros intereses similares de investigación en temáticas relacionadas con la gestión de construcción. Este proceso conduce a reconocer las relaciones entre los elementos y realizar el análisis de su impacto para el problema en cuestión.

ORIGINALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La originalidad de la investigación realizada radica en la identificación de los elementos en los cuales se aprecia la madurez y las relaciones entre ellos. Además, la forma en que estos elementos se agrupan y la manera en que se cuantifican las relaciones y sus efectos conllevan a identificar la madurez de LC en la gestión de producción de proyectos de construcción por medio de la estimación de índices de madurez. Se logra dar un paso adelante en la manera de establecer las estrategias para llegar a niveles superiores de madurez.

DESIGN SCIENCE RESEARCH (DSR)

Design Science Research o investigación en ciencia del diseño (DSR por sus siglas en inglés) viene siendo aceptada por la comunidad que investiga temáticas relacionadas con la gestión de construcción y, particularmente, por la comunidad interesada en ampliar el conocimiento en Lean Construction (LC) (Rocha, Formoso, Tzortzopoulos-Fazenda, Koskela y Tezel, 2012; Brady, Tzortzopoulos, Rooke, 2013; Smith, 2015). LaDSR es un tipo de investigación con capacidad para estudiar los fenómenos asociados con LC en el sector de construcción y desarrollar soluciones científicamente fundamentadas que contribuyan a resolver problemas reales en la construcción apoyadas en la experiencia y el conocimiento práctico de los expertos en el tema de interés. LaDSR permite establecer una relación entre la teoría y la práctica para fortalecer la relevancia de la investigación académica.

Un proceso de investigación, de manera general, reúne un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema, con los cuales, a partir de su aplicación, se emprende la búsqueda de conocimiento (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Se reconocen dos enfoques: el realismo, o enfoque cuantitativo, y el constructivismo, o enfoque cualitativo. Aunque pertenecen a diferentes corrientes de pensamiento, ambos utilizan estrategias similares en la búsqueda de conocimiento. Entre las estrategias, según Grinnel y Unrau (2005), se cuentan: la observación y evaluación de fenómenos, la construcción de suposiciones a partir de las observaciones y evaluaciones, la demostración del fundamento de las suposiciones con respecto de las pruebas y la proposición de estrategias para reafirmar las suposiciones y generar otras. Estos enfoques se pueden desarrollar de manera complementaria y es el investigador, dependiendo del contexto, la situación, los recursos disponibles, los objetivos y el problema de estudio, quien decide cuál de ellos usar (John, 2009; Niglas, 2010; Creswell, 2013).

El enfoque cuantitativo es exigente y riguroso sobre la realización de la investigación de manera secuencial y probatoria; requiere de la medición de variables y el análisis de la información posterior a la definición de las preguntas de investigación o hipótesis. Este es el enfoque más utilizado por las ciencias naturales debido a que con su ayuda se generalizan los fenómenos estudiados y es posible su repetición.

De otra parte, el enfoque cualitativo obtiene la información de una forma diferente; recoge datos contextualizados en el entorno de la investigación y experiencias que amplían el entendimiento de la problemática y su solución. A diferencia del enfoque cuantitativo, la investigación cualitativa

puede abordar las preguntas o hipótesis de investigación en cualquier momento de la recolección y el análisis de los datos con un punto de vista holístico de los fenómenos (Hernández *et ál.*, 2014). Este es el enfoque más usado en disciplinas humanísticas y aquellas relacionadas con la gestión, entre otras.

Una investigación rigurosa debe ser capaz de generar nuevos conocimientos teóricos y usarlos para resolver problemas; de esta manera entregar resultados relevantes y aplicables para la práctica (Hodkinson y Hodkinson, 2001; Holmström, Ketokivi, y Hameri, 2009; Van Aken y Romme, 2012). La investigación científica, según Van Aken y Romme (2012), desarrolla conocimiento de acuerdo con tres estrategias: las ciencias formales con la creación de sistemas de proposiciones abstractas y poniendo a prueba su consistencia lógica; las ciencias explicativas mediante la descripción, explicación o predicción de fenómenos observables (March y Smith, 1995) y las ciencias de diseño por medio del conocimiento con que se produce la creación e implementación de soluciones capaces de manipular o alterar un fenómeno particular (Kasanen, Lukka, y Siitonen, 1993; Vaishnavi y Kuechler, 2007).

La metodología de investigación en DSR fue la metodología escogida para el desarrollo de la investigación, para obtener el SLC-EModel. A continuación, se presentan aspectos relacionados con ella que soportan la investigación realizada.

La calidad de la investigación cualitativa

El hecho de que un proceso de investigación cualitativa sea más dinámico y flexible que un proceso de investigación cuantitativa no desvirtúa la calidad con que esta se lleva a cabo (Noreña, Alcaraz M., Rojas y Rebolledo M., 2012). De acuerdo con Calderón (2002), la evaluación de estudios cualitativos debe considerar la realidad y complejidad del fenómeno que se busca entender. Por lo tanto, las investigaciones cualitativas se evalúan de manera diferente a las del enfoque cuantitativo; se diferencian en la forma de plantear los problemas de investigación y la manera de abordarlos.

Los criterios de calidad para considerar el rigor de la investigación cualitativa, de acuerdo con Hevner, Marcet, Park y Ram (2004), son:

1. **Fiabilidad o consistencia:** Es la capacidad de replicar el estudio por otros investigadores al usar los mismos métodos y obtener resultados similares (Petty, Thomson y Stew, 2012; Kirk y Miller, 1986).
2. **Validez:** Es la interpretación correcta de los resultados y la manifestación del grado de fidelidad con que se muestra el fenómeno

- investigado. La validez refleja el cuidado exhaustivo del proceso metodológico; así la investigación se hace creíble.
3. Autenticidad: Es la aproximación que los resultados de una investigación tienen en relación con el fenómeno observado. Se evitan conjeturas a priori sobre la realidad estudiada por parte del investigador (Petty et ál., 2012).
 4. Transferibilidad o aplicabilidad: Consiste en poder transferir los resultados de la investigación a otros contextos (Bakås, Givaert y Van Landeghem, 2011).
 5. Dependencia: Este criterio hace referencia a la estabilidad de los datos. En la investigación cualitativa, por su complejidad, la estabilidad de los datos no está asegurada, como tampoco es posible una réplica exacta de un estudio.
 6. Neutralidad u objetividad: Los resultados de la investigación deben garantizar la veracidad de las descripciones realizadas por los participantes.
 7. Relevancia: Evalúa el logro de los objetivos del proyecto y si se obtuvo un mejor conocimiento del fenómeno o hubo alguna repercusión positiva en el contexto estudiado. Este criterio se refiere a la contribución con nuevos hallazgos y a la configuración de nuevos planteamientos teóricos o conceptuales.
 8. Concordancia teórico-epistemológica: Está determinada por la consistencia entre el problema o tema que se va a investigar y la teoría empleada para la comprensión del fenómeno.

La investigación en ciencias del diseño

Algunos autores se refieren a la DSR como investigación constructiva (IC), como lo describen en sus trabajos Smith (2015) y Rocha, Formoso, Tzortzopoulos-Fazenda, Koskela y Tezel (2012), sin embargo, hay sutiles diferencias entre estas dos formas de producción de conocimiento. En ambas estrategias se desarrollan artefactos para resolver problemas propios de algunas disciplinas en las que el conocimiento se adquiere a partir de la experiencia en la práctica profesional. De acuerdo con el trabajo de Piirainen y Gonzalez(2013), la IC busca resolver un problema por medio de un artefacto y mide su éxito y validez en función de la forma en que se percibe su utilidad para resolver el problema. LaDSR desarrolla también artefactos en diferentes entornos, especialmente en aquellos en que estos requieren ser evaluados en función de su utilidad.

La DSR se ha desarrollado, a partir de su conceptualización por Simon (1996), como una forma de crear conocimiento. Las primeras aplicaciones

fueron realizadas para resolver problemas de investigación en tecnologías de la información (TI). De otra parte, la IC fue conceptualizada para la gestión contable por Kasanen *et ál.* (1993) y, más tarde, Lukka (2003) amplía la perspectiva a otras áreas en las que la investigación científica no permite abordar las problemáticas de investigación según sus particularidades.

En términos generales, laDSR y la IC son bastante similares. Piirainen y González (2013) afirman que la IC es un subconjunto de la DSR, posicionando una de las principales diferencias entre la DSR y la IC, en la cual la DSR no requiere necesariamente la creación de un artefacto, y la investigación en la IC requiere de la validación del artefacto. Ambas son utilizadas para abordar problemas similares y desarrollan artefactos; sin embargo, hay otras diferencias en cuanto a la evaluación de la utilidad de la solución y sobre la contribución al conocimiento de la DSR. LaDSR considera el desempeño del artefacto con respecto de sus requisitos funcionales, en lugar de la validación de los conceptos teóricos asociados con el artefacto como sí lo hace la IC.

Ambos enfoques son pertinentes para investigación en áreas como administración de empresas, sistemas de información y tecnología, salud, ingeniería y, particularmente, gestión de la construcción (Kasanen *et ál.*, 1993; Lukka, 2003; Van Aken y Romme, 2012; Hevner, March, Park y Ram, 2004). Esto se logra al abordar y resolver problemas prácticos mediante la síntesis o construcción de artefactos basados en el conocimiento científico existente (Piirainen y González, 2013). Esta construcción, su utilización, contribuye a establecer fuertes relaciones entre la teoría y la práctica, lo que permite desarrollar el conocimiento a partir de los profesionales de la disciplina para diseñar soluciones a los problemas de campo, fortaleciendo así la relevancia de la investigación académica (Van Aken y Romme, 2012). Esto es lo que en investigación, en temas de gestión, se denomina el “dilema de la relevancia o el rigor” (Whyte, 1991). El dilema aparece cuando la “teoría está bien demostrada científicamente, pero entonces es demasiado reduccionista, y por lo tanto demasiado amplia o demasiado trivial para ser de mucha relevancia práctica, o pertinente a la práctica, pero que carece de una justificación suficientemente rigurosa” (Van Aken y Romme, 2012).

El objetivo de la DSR es “producir una construcción innovadora, destinada a resolver los problemas que enfrenta el mundo real y, por eso, significa hacer una contribución a la teoría de la disciplina en la que se aplica” (Lukka, 2003). Dicho de otra manera, la DSR cuenta con la capacidad de acercar las actividades académicas de un campo profesional con su homólogo de la industria (Smith, 2015), haciendo pertinente este tipo de investigaciones en el campo académico con el objeto de construir conocimiento

a partir de estas fuentes. La DSR ha demostrado ser una metodología con aplicación en el mundo real, capaz de sustentar la relevancia de los problemas que aborda.

La investigación en ciencias de diseño permite la creación de un “artefacto innovador intencional” de un dominio especial de un problema. Intencional, pues se desarrolla con el propósito de contribuir a la solución de un problema específico de la disciplina. El artefacto, una vez desarrollado, debe ser evaluado con el fin de asegurar su utilidad para resolver el problema especificado o proporcionar una solución más eficaz, que puede ser:

- una construcción: un desarrollo de conceptos de un dominio específico para describir un problema y proponer sus posibles soluciones: una nueva teoría, un algoritmo, un *software*, una herramienta de evaluación, etc.,
- n método: que es un conjunto de pasos para la ejecución de una tarea,
- un modelo o un marco: un grupo de elementos que expresan las relaciones entre los constructos, o
- una instancia: una aplicación de constructos, modelos y métodos para demostrar la viabilidad de los elementos conceptuales que la solución contiene. Esta instancia puede estar desarrollada en términos de la epistemología, la teoría, el método y la técnica (Bellini, 2003).

Una característica destacada de la DSR se refiere a la forma de validación del artefacto, la cual no tiene la exigencia de la investigación exploratoria basada en evidencia empírica.

Lo que sí es importante es que las conclusiones tienen que ser argumentadas de manera objetiva y definida. Esto puede implicar la evaluación de la “construcción” que se está desarrollando analíticamente vs. algunos criterios predefinidos o realizar algunas pruebas de referencia con el prototipo” (Smith, 2015).

La construcción de artefactos

March y Smith (1995) afirman que el proceso de investigación se basa en la creación de “cosas” que sirven a los propósitos humanos y la evaluación de su desempeño en uso. La investigación en DSR implica la presencia de bucles de realimentación en cada uno de los ciclos que componen el proceso de investigación, como se detallará más adelante: relevancia, diseño y rigor.

La creación del conocimiento da lugar a la revisión detallada del problema, la cual conduce a un nuevo ciclo de diseño (Vaishnavi y Kuechler, 2007). En la fase de conclusión, al entender el impacto del problema, surge

un nuevo ciclo de investigación dependiendo del alcance de este impacto. La etapa de construcción sin duda es la que implica la mayor cantidad de bucles; es un proceso iterativo e incremental (Hevner *et ál.*, 2004). La aplicación y el ensayo de una solución preceden a su completo desarrollo, y solo a través de su estudio y su utilización es posible formalizar los artefactos desarrollados (March y Smith, 1995).

El proceso de investigación, así entendido, se lleva a cabo por medio de tres ciclos con actividades altamente relacionadas:

- **El ciclo relevancia:** da inicio a la DSR por medio de la contextualización de su aplicación. Se proporcionan los insumos de la investigación a manera de requisitos, las restricciones para su diseño y se definen los criterios de aceptación de la evaluación de los resultados de la investigación.
- **El ciclo de diseño:** corresponde a las actividades y procesos centrales de la investigación. En este ciclo se desarrollan la construcción y la evaluación de los artefactos de diseño (Hevner, 2007). La proposición de hipótesis sobre el comportamiento esperado que conduce a “cuestionar, buscar explicaciones, y en última instancia a una modificación de la solución” (Manson, 2006).
- **El ciclo rigor:** en este ciclo se proporciona el conocimiento que permite asegurar la innovación por medio de las soluciones factibles accediendo a las teorías que sustentan el conocimiento (Gregor y Jones, 2007). Aquí los investigadores están obligados a hacer referencia a la base del conocimiento para garantizar que los artefactos producidos son contribuciones no rutinarias con fundamento en la aplicación de procedimientos de investigación reconocidos.

Los artefactos obtenidos en DSR se perciben a partir del conocimiento que contienen, y deben ser útiles para abordar la solución a problemas relevantes para la organización (March y Storey, 2008; Gill y Hevner, 2013). Además de los artefactos de diseño mencionados, se reconocen otras construcciones como artefactos: las innovaciones sociales, nuevas o previamente desconocidas propiedades de los recursos técnicos, sociales o de información (March y Storey, 2008), nuevas teorías explicativas, nuevos modelos de diseño y desarrollos e implementación de procesos o métodos (Ellis y Levy, 2010).

Para orientar la investigación en DSR, Hevner *et ál.* (2004) han presentado un conjunto de directrices tomadas con base en las TI. Entonces, la investigación en DSR debe ser capaz de:

1. Diseñar un artefacto: producir un artefacto viable en la forma de una construcción, un modelo, un método o una creación de instancias.
2. Demostrar la relevancia del problema: desarrollar soluciones basadas en la tecnología para problemas relevantes de la disciplina.
3. Evaluar el diseño: demostrar la utilidad, la calidad y la eficacia del diseño rigurosamente a través de métodos de evaluación que le sean pertinentes.
4. Proporcionar contribuciones de investigación: proporcionar contribuciones claras y verificables en forma de un artefacto que aporte en la fundamentación del conocimiento.
5. Garantizar el rigor de la investigación: aplicar una metodología rigurosa para la construcción y evaluación del artefacto.
6. Desarrollar el diseño como un proceso de búsqueda: propiciar los medios para alcanzar los objetivos bajo las restricciones del entorno del problema.
7. Comunicar los resultados de la investigación: presentar de manera efectiva los resultados a la tecnología y al público orientado a la gestión.

La utilidad del artefacto, demostrada a partir de la evaluación, debe garantizar su sostenibilidad en el tiempo (Gill y Hevner, 2013) para lo cual se dispone de un set de prácticas: observación, análisis, experimentación, prueba y descripción (Hevner *et ál.*, 2004). Es importante resaltar que el uso de estas prácticas no es un proceso estrictamente lineal, ya que la evaluación en sí misma tiene la capacidad de identificar situaciones no estudiadas previamente que conducen a producir nuevos conocimientos. Vaishnavi y Kuechler (2007) y Peffers, Tuunanen, Rothenberger y Chatterjee (2008) sostienen también que el diseño y la evaluación pueden llegar a revelar un problema totalmente diferente que hay que resolver; en ambos casos, estos conocimientos se integran a un nuevo ciclo de diseño dando lugar a cambios que a su vez requieren nuevas evaluaciones.

Una solución es completa y eficaz cuando satisface los requisitos y restricciones del problema que estaba destinado a resolver. Por medio de la DSR se desarrollan e implementan soluciones innovadoras para abordar problemáticas de gestión en la construcción (AlSehaimi, Koskela, y Tzortzopoulos, 2013). Es una manera de crear conocimiento desde la práctica profesional para fortalecer la importancia académica en la gestión de construcción de acuerdo con Koskela (2008). En este sentido, tanto la construcción, como la evaluación del artefacto se deben realizar con rigor, y los resultados de la investigación deben ser presentados de manera efectiva a los usuarios de la solución. Hevner *et ál.* (2004) ofrecieron una novedosa

mirada a la DSR dándole importancia como una metodología que permite mejorar las condiciones asociadas al rigor y la relevancia.

Partes del artefacto y sus funciones

A partir de la comprensión de los resultados de la DSR que se obtienen con el artefacto, se entienden sus partes y sus funciones (Brady, Tzortzopoulos, Rooke, 2013), de esta manera los criterios de evaluación para los cuales este cumple su función se pueden aplicar a cada parte. Los resultados de la DSR se especifican como: el constructo, el modelo, el método y la instanciación (March y Smith, 1995). Estos autores sugieren la forma de evaluar cada resultado, así:

- **El constructo:** Constituye una construcción “completa”, simple, elegante y fácil de usar. Incluye conceptos y vocabulario propio del campo en que se desarrolla, así como la descripción de los problemas y soluciones propias de él.
- **El modelo:** Es un conjunto de proposiciones que representan las relaciones entre constructos. Representa fielmente la manera como son o deberían ser los fenómenos en el mundo real. Se trata de un elemento completo, con un adecuado nivel de detalle, robusto y con una adecuada consistencia interna.
- **El método:** Es el conjunto de pasos que se requieren para completar una tarea. El método permite realizar de manera sencilla la tarea o tareas previstas y debe ser de uso general,
- **Instanciación:** La capacidad para el manejo adecuado de la información que el artefacto requiere. Este manejo debe ser eficiente y efectivo en el ambiente para el que se usa.

El modelo de evolución de la madurez como un artefacto según la Design Science Research (DSR)

El diseño de nuevos modelos de madurez debe cumplir con los ocho criterios de calidad de Hevner, Marcet, Park y Ram (2004), como resaltan Becker, Knackstedt y Pöppelbuß (2009) quienes recomiendan que el modelo sea evaluado para demostrar su idoneidad por medio de métodos que expongan la rigurosidad de la investigación. Este es el punto diferenciador entre artefactos diseñados con el propósito de contribuir a resolver la cuestión y aquellos orientados al desarrollo de modelos conceptuales.

El SLC-EModel es un artefacto, por lo que la aplicabilidad del paradigma de la DSR es completamente pertinente. Esta investigación tiene que ver con gestión de producción y con personas, lo que la acerca a una investigación cualitativa similar a la utilizada en temas propios de gestión

y humanidades. Este enfoque es requerido para desarrollar la investigación cualitativa cuyo tema se enmarca en la gestión de la construcción con una directa relación con personas. Wendler (2012) sostiene que para el desarrollo de nuevos modelos de madurez no es suficiente su existencia en términos de contenido y estructura; se requiere probar su utilidad para ser aplicados y conocer sus beneficios en el contexto para el cual se diseñó.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

La investigación desarrolló las actividades presentadas en la Figura 1.1, las cuales están asociadas a los objetivos específicos que se explican a continuación, y sigue el flujo de trabajo mostrado en la Figura 1.2. Se precisa el gap con ayuda de la revisión de la literatura y se propone el desarrollo el SLC-EModel en la GPC para contribuir al mejoramiento de la eficiencia de los proyectos de construcción. En esta etapa de la investigación se parte de una posición teórica y se seleccionan los métodos para obtener la información requerida en el plan de trabajo para alcanzar los objetivos especificados. La investigación se desarrolla de acuerdo con el enfoque cualitativo enmarcada en laDSR integrando métodos y procedimientos cuidadosamente seleccionados para el estudio, la recopilación, organización y análisis de datos, y la definición de procedimientos que permitan la síntesis.

Los objetivos de investigación y las actividades para el desarrollo

En la Figura 1.1 se relacionan los objetivos específicos que despliegan el objetivo principal de la investigación. A su vez, cada objetivo principal se desarrolla a través de actividades, con entregables por medio de los cuales se verifica el cumplimiento de los objetivos específicos y, con el cumplimiento de estos, el del objetivo general.

Con respecto del primer objetivo específico, contribuye a entender la construcción como un proceso de producción, con características equivalentes a la manufactura. Estas características se asocian con los entornos de producción y el sistema de producción de proyectos de construcción, los cuales son diferentes decualquier otro tipo de proyecto. Estas características acercan a los interesados a un mejor entendimiento de la actividad edificadora, como una actividad de producción que puede ser continuamente mejorada con la integración de métodos, herramientas, modelos, etc., de otros sectores como la ingeniería industrial, principalmente. De esta manera, la construcción debería buscar un esquema de producción que elimine la tradición constructiva actual. En esta tradición, la producción se desarrolla

como la suma de recursos en un flujo de trabajo que da como resultado un activo físico con una baja eficiencia para obtenerlo. En este sentido, es conveniente, para la investigación, establecer la relación de Lean con la GPC, y conocer y entender las barreras y los factores de éxito involucrados en su implementación. El entendimiento de las barreras y los factores de éxito contribuye a seleccionar, preliminarmente, los elementos que se agrupan más adelante en categorías y factores de madurez en la construcción del SLC-EModel. Al consultar a expertos, se obtiene información que permite fundamentar conceptos tales como la madurez de LC en la GPC y otros que se derivan de su experiencia en la implementación de LC.

El segundo objetivo se fundamenta en la realización de entrevistas a los expertos en diferentes momentos de la investigación. Cada entrevista llevó sistemáticamente a la identificación de los elementos de interés en la investigación y orientó el estudio de las referencias bibliográficas. Ambas actividades permitieron identificar un gran número de elementos relacionados con la madurez de LC en la GPC, que más tarde son agrupados en categorías, factores y atributos de madurez. Los atributos de madurez son objeto de una validación racional para confirmar aquellos que deben ser incluidos en la consulta principal a expertos por medio de la encuesta. Más adelante, con esta información y el uso del modelo de ecuaciones estructurales (SEM), se identifican las relaciones entre todos los elementos de madurez involucrados en el modelo paradesarrollar el SLC-EModel.

El tercer objetivo se centra en el desarrollo del modelo. Contiene el modelo de calificación de la madurez, cuyos resultados se presentan a través de los perfiles de madurez. Con los perfiles y la información obtenida en la evaluación, se consolida la estrategia de evolución, la cual se desarrolla a partir del conocimiento de la madurez de los atributos y cómo estos contribuyen a la madurez local y global. La validación del modelo se lleva a cabo en cada uno de los pasos de elaboración y análisis del SEM, en el desarrollo del índice de madurez con el modelo estadístico, en la simulación de la obtención de los índices locales y el índice global para diversas configuraciones de calificación de diferentes sujetos de estudio.

Los métodos de investigación seleccionados

Los métodos utilizados permitieron que se obtuviera de manera progresiva la información requerida por la investigación, la cual se logró de tres fuentes: consulta a bases de datos, entrevistas y encuestas a expertos. La metodología utilizada en la consulta a las bases de datos se presenta en el Capítulo 2, la cual se adelantó por medio de un mapeo sistemático de referencias bibliográficas.

Para las entrevistas, se hizo un registro en audio, autorizado por el entrevistado, identificado en un archivo digital y con su correspondiente transcripción. Para la encuesta se utilizó la aplicación Google Formularios. Esta aplicación produce un archivo digital en formato Excel con todas las respuestas recibidas, el cual fue analizado para extraer la información solicitada a los expertos para caracterizar la muestra. Cada columna de respuestas se identifica con etiquetas para su uso con el *software*. Para el análisis de esta información se utilizaron *softwares* como: R, SPSS y WarpPLS.

Revisión de la literatura

La revisión de la literatura fue una actividad permanente durante el desarrollo de la investigación, y se hizo uso de las “alertas”, herramientas propias de las bases de datos para monitorear la publicación de artículos con las temáticas relacionadas con la investigación. De esta manera, se obtuvieron referencias actualizadas sobre el tema principal de investigación, las cuales se integran a los capítulos del desarrollo del SLC-EModel.

Como una de las primeras actividades, se identificaron diferentes temáticas y los problemas actuales que ocupan a los investigadores, para enmarcar el interés de la investigación e identificar brechas del conocimiento que la hicieran relevante para la disciplina (Meredith, 1993). La revisión de la literatura se adelantó mediante un estudio de mapeo sistemático de referencias bibliográficas siguiendo la metodología de Wendler (2012) y Becker *et ál.* (2009). Este estudio se presenta en el Capítulo 2 y sus resultados fueron publicados en la revista *Espacios*, vol. 38, n.º 39, año 2017, pág. 30, revista categoría Q3 del JCR, (Cano, Botero y Rivera, 2017b). En este artículo se desarrolla el método de búsqueda, se realiza el análisis de la literatura para la investigación, se identifica la brecha en la cual se enmarca la investigación y se mencionan otros temas de interés para investigaciones futuras.

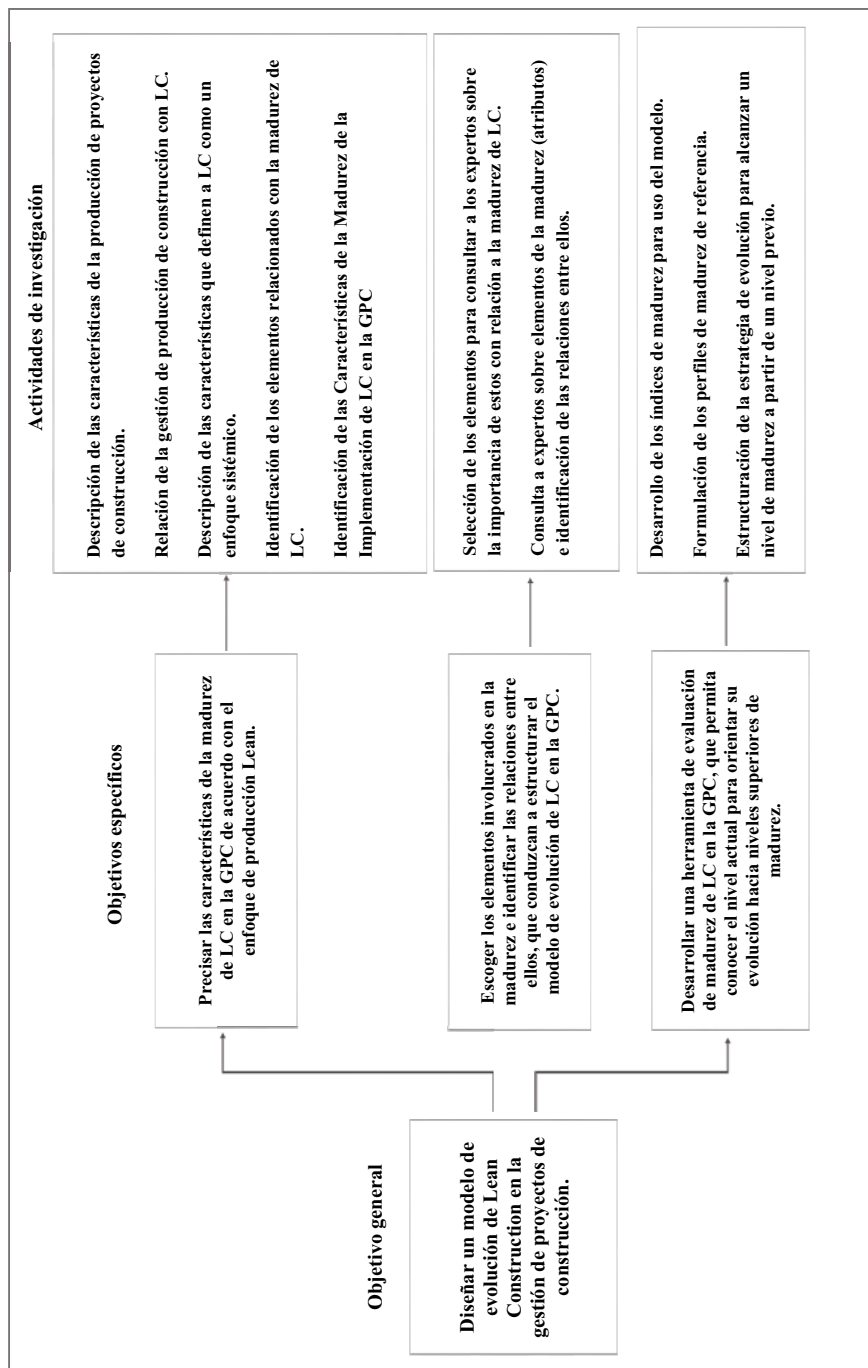


Figura 1.1. Esquema de objetivos y actividades de investigación.

Fuente: elaboración propia.

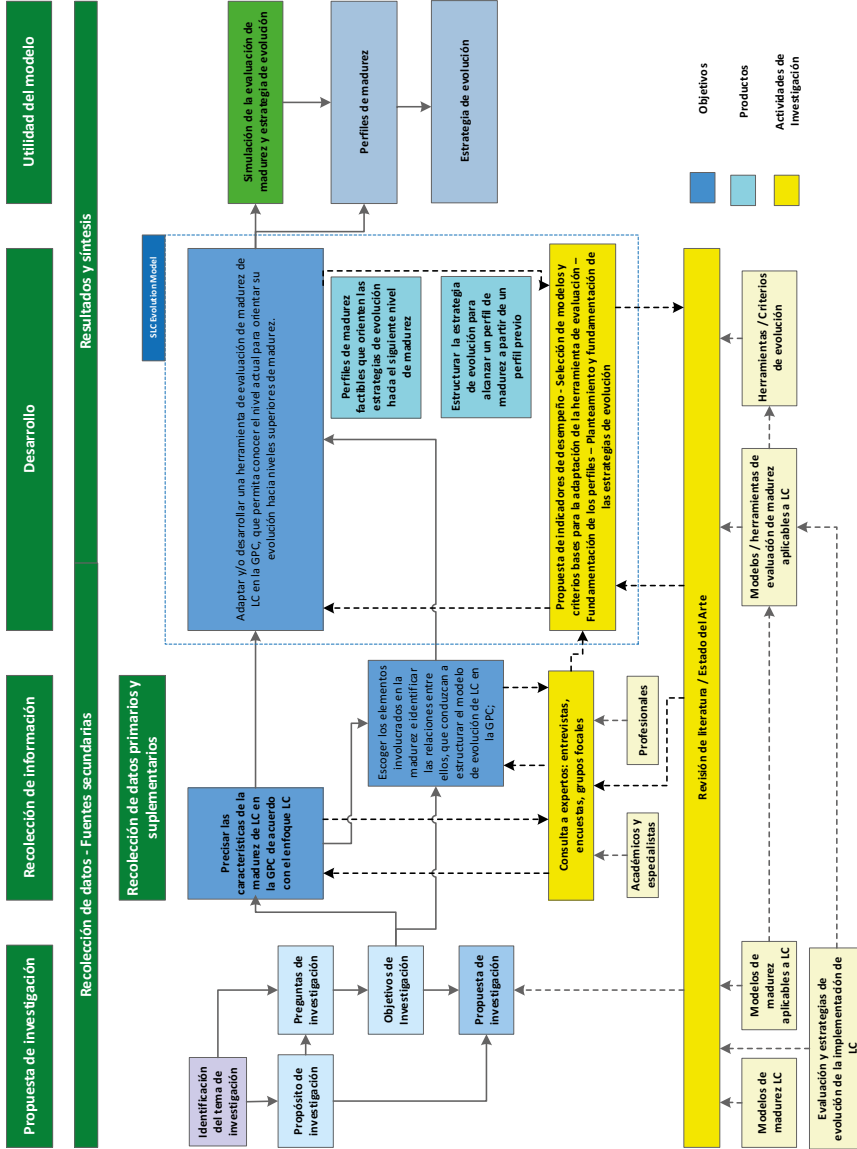


Figura 1.2. Esquema general de desarrollo de la investigación.

Fuente: elaboración propia.

La entrevista individual

Se llevaron a cabo tres etapas de entrevistas semiestructuradas con investigadores, académicos, consultores y practicantes, directamente relacionados con el proceso de investigación, implementación y gestión de LC. Cada una de las entrevistas fue diseñada con preguntas abiertas que dan lugar a que el entrevistado exprese su percepción acerca de la cuestión específica, y sobre temas relacionados que el mismo entrevistado conecta como importantes sobre el tópico en investigación (Britten, 1995). En estas entrevistas, de acuerdo con Kvale (2007), es importante considerar la reacción e interacción del investigador, lo que permite ampliar el entendimiento y la precisión respecto de las respuestas del entrevistado, además de que el investigador puede consultar, en el mismo sentido de la respuesta, elementos complementarios de su interés que permitan profundizar en el tema, principalmente en la experiencia personal del entrevistado (Easterby-Smith, Thorpe y Loewe, 1991; Shehu y Akintoye, 2010). De acuerdo con Kvale (2007) y Nesensohn (2014), el número de entrevistas a realizar varía entre cinco y veinticinco, en razón del tipo de estudio cualitativo. El rango de entrevistas recomendado tiene que ver con restricciones de tiempo y recursos tanto del entrevistado como del investigador.

Las etapas de realización de las entrevistas

Estas entrevistas se llevaron a cabo en tres momentos de la investigación y permitieron identificar progresivamente información relevante:

- Etapa I: Entrevista exploratoria inicial.
- Etapa II: Entrevista para precisar categorías y factores de madurez.
- Etapa III: Entrevista principal para identificación de elementos de madurez.

Pruebas piloto y desarrollo de las entrevistas

Con cada formulario de entrevista, se aplicó primero una prueba piloto a cinco expertos en Colombia. Se buscó establecer la precisión de su contenido. Esta prueba piloto permitió identificar preguntas que generaban confusiones en el entrevistado y corregirlas para disponer de un formulario de preguntas conforme con el objeto de estudio (Remenyi, Williams, Money y Swartz, 1998).

Luego de contar con el formulario de preguntas ajustado, las entrevistas se condujeron personalmente en los lugares de trabajo de cada uno de los entrevistados. No obstante, hubo que realizar tres entrevistas de la etapa I y dos de la etapa III de manera virtual en razón de la ubicación del entrevistado. A todos los entrevistados se les consultó, antes de iniciar la entrevista,

su aceptación para participar de la investigación, así como su autorización para permitir la grabación de la sesión. En ningún caso se les dio a conocer por adelantado el formulario de preguntas, buscando recibir la información del experto sin que estuviese influenciada por las preguntas.

Antes de iniciar la entrevista, la investigadora hacía una introducción explicando el propósito de la investigación y las generalidades de la temática. Cada formulario fue elaborado para que la entrevista fuera desarrollada con una duración de una hora, sin embargo, se presentaron entrevistas que requirieron entre una hora y treinta minutos y dos horas. Cada entrevista fue transcrita en un lapso inferior a una semana después de su realización.

Análisis de las entrevistas

El análisis de las entrevistas se realizó siguiendo la recomendación del método desarrollado en el trabajo de Nesensohn (2014), el método Framework©. El método fue desarrollado por Ritchie y Spencer (1994) y su uso se concentra en la organización y gestión de la investigación a través del compendio de la información, de la cual una matriz robusta y flexible que permite al investigador analizar los datos por caso y por tema. El método Framework© es un método de análisis temático o análisis de contenido cualitativo. Ayuda a identificar aspectos comunes, y diferencias, en los datos cualitativos antes de centrarse en las relaciones entre las diferentes partes de los datos. Con la ayuda de este método se pretende obtener conclusiones descriptivas y/o explicativas respecto del o los temas de interés de la investigación.

El desarrollo de los temas es una característica común de análisis de datos cualitativos que implica la búsqueda sistemática de patrones para generar descripciones completas capaces de arrojar luz sobre el fenómeno que se investiga. El método Framework© es más utilizado para el análisis temático de transcripciones de entrevistas semiestructuradas. No tiene la capacidad de análisis de datos altamente heterogéneos, por lo que es recomendado para estudiar temas clave, así los entrevistados tengan diferentes puntos de vista o experiencias en relación con cada tema, para establecer sus relaciones, encontrar diferencias o semejanzas notables en esta comparación.

El procedimiento de análisis para el método Framework© considera que:

- idealmente se requiere una buena calidad de transcripción literal del audio de la entrevista,
- el investigador debe familiarizarse con toda la entrevista mediante la grabación de audio y/o transcripción y las notas contextuales que fueron registradas por el entrevistador,

- se codifican los objetivos para clasificar todos los datos de modo que puedan ser comparados sistemáticamente con otras partes del conjunto de datos,
- se desarrolla un marco analítico de trabajo mediante la comparación de las etiquetas que hayan sido definidas y aplicadas a las transcripciones,
- se aplica el marco analítico de trabajo mediante la indexación de las transcripciones utilizando las categorías y los códigos existentes,
- se realiza la cartografía que resume los datos por categoría de cada transcripción.

Finalmente, en la interpretación de los datos, se identifican las características y las diferencias entre los datos para explorar relaciones y/o causalidad.

La encuesta

Es la actividad que permite, con la participación de expertos, identificar la importancia de los elementos de interés del investigador. Con ella, el investigador obtiene una valoración subjetiva de los expertos respecto de los elementos de interés que han resultado de la revisión de la literatura y de la entrevista principal. Esta información es objeto de un análisis cuantitativo de la información obtenida para desarrollar la modelización de las relaciones entre los elementos con el uso de SEM. El SEM es una técnica estadística multivariada que permite probar y estimar relaciones causales a partir de datos estadísticos y suposiciones cualitativas sobre la causalidad que más adelante se debe confirmar.

Esta encuesta contó con dos partes y sesenta y seis preguntas con solicitud de respuestas obligatorias para garantizar que no faltaran datos. La encuesta fue desarrollada en la aplicación Google Formularios, en la cual cada respuesta se recibe automáticamente y la aplicación entrega la información tabulada para ser analizada posteriormente. El formulario de preguntas de la encuesta fue escrito en tres idiomas: español, inglés y portugués, y antes de su aplicación se sometió a una prueba piloto con cinco expertos en Colombia.

En el archivo de la información tabulada, como una medida de seguridad de la información, se protegieron la hoja y el libro con contraseñas para eliminar el riesgo de que, al abrir el archivo, por equivocación o descuido, se alterara su contenido.

La recolección y el tratamiento de la información

Muestreo

Con el diseño de las muestras, se busca identificar la cantidad de participantes y, con la aplicación de criterios obligatorios y complementarios para dicha muestra, se seleccionaron los participantes que cuentan con el conocimiento y la experiencia en LC. En la Tabla 1.2, se presenta la información de las muestras previstas y la cantidad de información obtenida para cada actividad de recolección de información.

Tabla 1.2. Selección de la muestra para cada una de las actividades de recolección de información

Actividad de recolección de información	Criterios para la selección de participantes	Características	Tamaño de la muestra	Obtenidos
Entrevista exploratoria inicial	Obligatorio	-Uno o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización -Uno o más años de experiencia en la industria de la construcción, o -Investigador o profesor universitario con experiencia en LC	Dieciocho empresas constructoras (profesionales en empresas constructoras colombianas)	Treinta profesionales en empresas constructoras colombianas
	Complementario (opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		
Entrevista exploratoria referida a la identificación de categorías de madurez	Obligatorio	-Cinco o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización -Cinco o más años de experiencia en la industria de la construcción, y/o -Investigador o profesor universitario con experiencia en LC	Entre cinco y veinticinco profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC en Colombia y Chile	Diez expertos en investigación y/o implementación y desarrollo de LC: Dos en Colombia y Ocho en Chile
	Complementario (opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		

Actividad de recolección de información	Criterios para la selección de participantes	Características	Tamaño de la muestra	Obtenidos
Entrevista principal para la identificación de los elementos de madurez	Obligatorio	-Cinco o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización, y/o -Cinco o más años de experiencia en la industria de la construcción, y/o -Investigador o profesor universitario con experiencia en LC	Entre cinco y veinticinco profesionales con experiencia en LC, sin embargo, se precisan al menos doce profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC, así:	Veintinueve expertos en investigación y/o implementación y desarrollo de LC: -Tres en Colombia -Doce en Chile -Diez en Brasil -Cuatro en Perú
	Complementario (Opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC	-Tres en Colombia -Tres en Chile -Tres en Brasil -Tres en Perú	
Encuesta	Obligatorio	-Tres o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización, y/o -Tres o más años de experiencia en la industria de la construcción	Noventa profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC alrededor del mundo en países según investigaciones publicadas en revistas de alto impacto.	111 profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC en cuatro continentes y diecinueve países.
	Complementario (Opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		

Etapa I. Entrevista exploratoria inicial

Se llevó a cabo con treinta participantes de empresas constructoras colombianas que vienen desarrollando procesos de implementación LC. El obje-

tivo de esta entrevista fue identificar, por medio de la experiencia y conocimientos del entrevistado, aspectos relevantes sobre seis temas de interés desarrollados en veintiséis preguntas que condujeran a precisar el alcance de la investigación:

- a. Los modelos de gestión desarrollados en la organización para identificar con cuál modelo se lleva a cabo la gestión en la organización.
- b. La identificación del entorno de producción en que se ha desarrollado la actividad de producción para identificar las categorías en las cuales se clasifican los diferentes tipos de proyectos de construcción de acuerdo con la teoría relacionada en manufactura.
- c. La identificación del sistema de producción para precisar, con ayuda de sus características, el tipo de sistema que es la producción en construcción de acuerdo con la teoría relacionada en manufactura.
- d. Conocer el proceso de implementación de LC para identificar las barreras que se oponían a esta implementación, así como los factores que los practicantes consideraron como responsables del éxito de la implementación, o los factores críticos de éxito (FCE) y las referencias bibliográficas. Se previó que su identificación permitiera agruparlos en categorías que podrían ser las categorías del modelo de madurez.
- e. Explorar el entendimiento del concepto de valor por parte de la organización, por medio de los entrevistados, para considerar este entendimiento, la teoría y referencias bibliográficas sobre valor para considerarlos en la construcción del modelo de evolución.
- f. Explorar en los entrevistados el entendimiento de la madurez en términos de LC, y las características que permitieran aproximar esta investigación a la identificación de los factores y elementos de madurez.

Desarrollo del tamaño de la muestra

Se desarrolló una muestra representativa por medio de un cálculo basado en una distribución normal, teniendo en cuenta la población total de constructoras colombianas que, según la Superintendencia de Sociedades, para el año 2015 correspondían a 765. Para el desarrollo del tamaño de la muestra, se tomaron en cuenta los valores recomendados por la literatura en cuanto al nivel de confianza, proporción esperada y el tamaño de la población obtenido. Para la precisión esperada, que es otra de las variables importantes dentro de este cálculo, se decidió, con criterio propio, tomarla en un 10% con el fin de adecuar esta muestra a las limitaciones encontradas a la hora de realizar el trabajo de campo, dado que la industria de construcción colombiana tiene un nivel bajo de documentación LC que disminuye o limita la cantidad de información proporcionada por las empresas.

Para calcular la muestra representativa de acuerdo con la población total, se utilizó la ecuación general basada en una distribución normal, que se transcribe continuación:

$$n = (N * Z_{\alpha}^2 * p (1 - p)) / (d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p (1 - p))$$

Donde:

N: población: 756 empresas

Z_{α} : valor de Z para el nivel de confianza: 1,96 (95%)

p: proporción esperada: 5%

d: precisión: 10%

n: tamaño de la muestra: 18 empresas.

Recolección de información

Las entrevistas se llevaron cabo entre los meses de agosto de 2014 y marzo de 2015. El proceso de difusión de LC en Colombia fue descrito por Páez *et ál.* (2013) y su inicio lo ubica en el año 2000, a partir de una misión técnica, compuesta por un grupo de gerentes de compañías constructoras colombianas que viajaron a Brasil y a Chile acompañados de algunos académicos, cuyo propósito fue conocer prácticas productivas en esos países para mejorar el desempeño de sus proyectos. Al conocer LC como una estrategia de GPC y entender su valor para mejorar la productividad de los proyectos de construcción, deciden iniciar procesos de implementación apoyados en los académicos. En el año 2002, los profesores Diego Echeverry de la Universidad de los Andes y Luis Fernando Botero de la Universidad Eafit, apoyados por Gepuc¹, con el profesor Luis Fernando Alarcón y Norie² con el profesor Carlos Torres Formoso, establecieron las bases para la difusión de LC en Colombia, tanto en la academia como en la práctica.

La estrategia principal que ha sido empleada para la difusión de LC en Colombia es la sensibilización a nivel directivo de las empresas y la profundización con el grupo de producción a través de la capacitación sobre los principios, los conceptos y las herramientas. Hasta el año 2015, según reportes de Camacol, se han capacitado más de 2.400 profesionales en cursos abiertos y cerrados en todo el país (Botero, 2013). Esta capacitación se ha desarrollado por medio de la Cámara Colombiana de la Construcción, Camacol, en colaboración con UniversidadEafit, con la dirección del profesor

¹ Gepuc: Centro de Excelencia en Gestión de la Producción de la Universidad Católica de Chile.

² Norie: Núcleo Orientado para la Innovación de la Edificación de la Universidad Federal Rio Grande Do Sul, UFRGS.

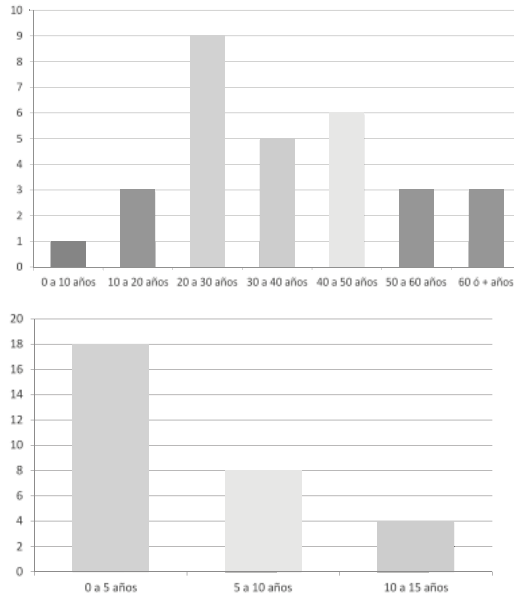
Luis Fernando Botero Botero, y como iniciativas de empresas constructoras de manera independiente. Algunas de las empresas a las cuales pertenecen los profesionales capacitados iniciaron un proceso de implementación asesorado por expertos.

En el año 2003, (Botero, 2004) el profesor Botero lideró un proyecto de capacitación para treinta y cinco empresas de la construcción, en el marco de un acuerdo entre Camacol y Eafit. Estas empresas recibieron formación en LC; sin embargo, solo dieciocho de ellas lo implementaron. De estas dieciocho empresas, en la mitad de ellas se reportó la existencia de una cultura orientada hacia LC. Estas empresas informan que han implementado LC en sus procesos de administración de proyectos con resultados diversos, pero en general satisfactorios (Páez *et ál.*, 2013). Este trabajo de difusión ya ha alcanzado logros importantes, y en algunas empresas se cuenta con una estructura LC en la obra, con cargos específicos como director de productividad, director Lean, residente Lean, director de gestión integrada.

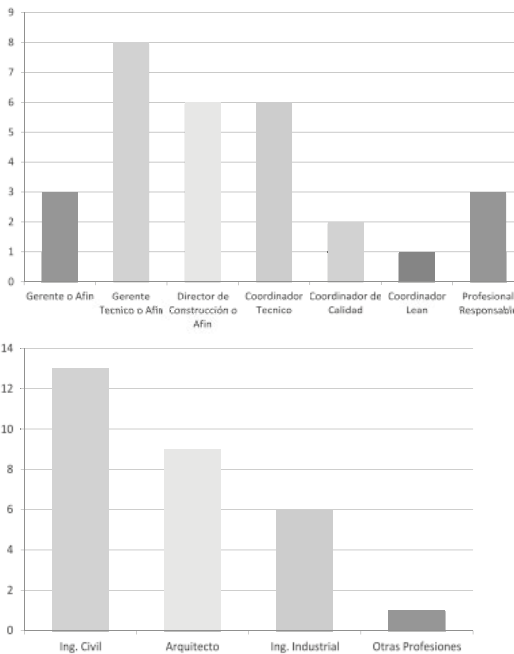
Es así como, para el 2015, se contaba en la Universidad de Eafit con un registro de cincuenta empresas constructoras, de las cuales treinta respondieron positivamente a esta investigación. Con esta muestra se reporta información que pretende ser valiosa para el desarrollo de LC en Colombia. Las empresas que se encuentran adelantando procesos de implementación de LC son de diferentes rangos de antigüedad, lo que muestra que la edad de la empresa no es una barrera para integrar LC. En las Figuras 1.3 y 1.4 se muestra que los procesos de implementación de LC vienen realizándose por más de quince años. Sin embargo, el interés en LC se aprecia con un grupo importante de empresas que cuentan con al menos cinco años en su proceso de implementación. En este estudio se concluyó que estas empresas hacen uso de entre dos y cinco herramientas LC, siendo Last Planner System (LPS) la herramienta más utilizada. En general, las empresas perciben LC como el uso de LPS y se debería evaluar el nivel de utilización e impacto de la herramienta.

Las actividades de implementación y desarrollo de LC están a cargo de profesionales que dirigen otros procesos. En un solo caso se dispone de un coordinador Lean, sin que este coordinador cuente con un amplio margen de acción; sus tareas se limitan a coordinar las reuniones LPS y recoger y publicar la información que requiere esta herramienta, Figura 1.5.

La mayoría de los profesionales a cargo de LC son ingenieros civiles, en un 46, 67%, Figura 1.6. Se aprecia una alta participación de arquitectos e ingenieros de otras áreas, principalmente industriales. También se identificó la participación de profesionales de otras disciplinas, principalmente provenientes de la industria manufacturera, donde adquirieron conocimientos en Lean Manufacturing.



**Figura 1.3. Antigüedad de la empresa constructora y
Figura 1.4. Tiempo de implementación de LC**



**Figura 1.5. Cargo de los responsables de LC y
Figura 1.6. Profesionales responsables de LC**

Respecto de los responsables de LC, en un 96,67% son profesionales con experiencia en construcción mayor a 5 años, como se aprecia en la Figura 1.7. El 46,67% cuenta con poca antigüedad en la empresa, lo que se puede entender como un indicio relacionado con la frecuente rotación de personal profesional en los proyectos, Figura 1.8. En esta misma lógica, el 63,33% de los profesionales responsables de LC cuenta con menos de 10 años de antigüedad en la empresa, siendo los profesionales con más de 25 años de experiencia en la empresa quienes constituyen la alta dirección.

El 62,5% de estos profesionales cuenta con experiencia en LC menor o igual a cinco años. El 95,8% del total de profesionales responsables de LC no supera los 10 años de experiencia, siendo esto consistente con el tiempo reportado de implementación LC en el país, que muestra un pequeño grupo de profesionales con experiencia LC entre 11 y 15 años, correspondientes al 4,2%. En las empresas relacionadas en este estudio, y que recibieron capacitación en LC en los inicios de difusión de la LC en Colombia, solo se mantiene un 4,2 % de profesionales que cuentan con experiencia en este rango Figura 1.9.

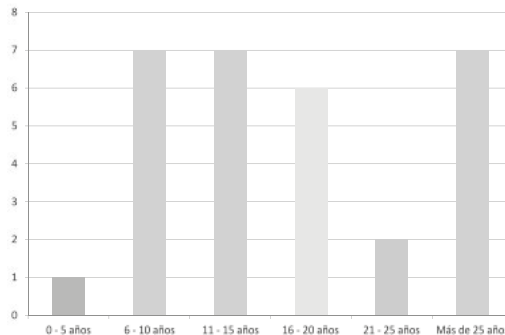


Figura 1.7. Experiencia general de los profesionales responsables de LC

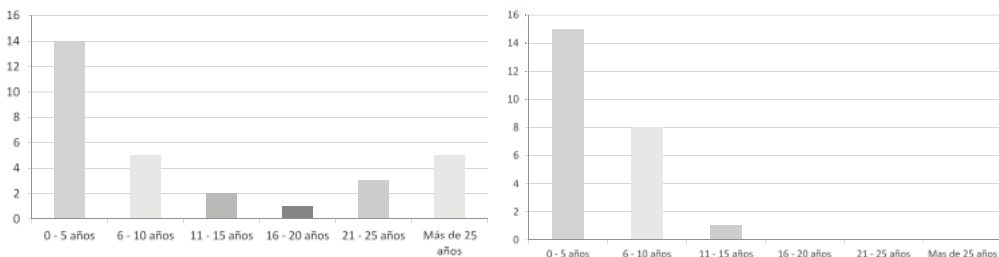


Figura 1.8. Antigüedad de los profesionales y
Figura 1.9. Experiencia en LC de la empresa LC en la organización constructora

Etapas II. Entrevista exploratoria para precisar categorías y factores de madurez

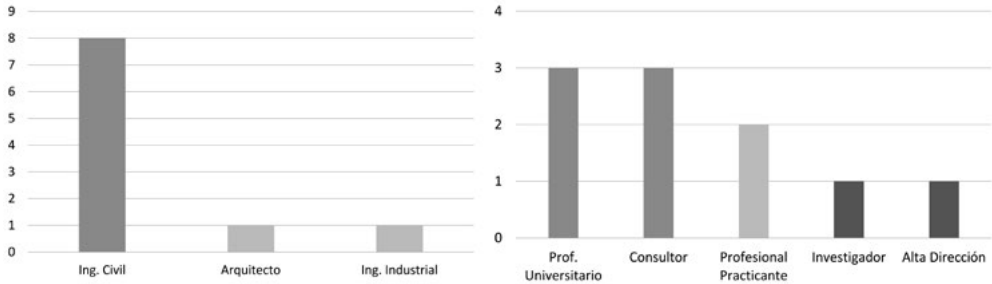
Se desarrolló una entrevista con la participación de diez profesionales con experiencia en LC. Esta entrevista fue adelantada con dos investigadores en Colombia y ocho investigadores y expertos en Chile. Este trabajo se realizó en el marco de una pasantía de investigación en la Universidad Católica de Chile. El objetivo fue precisar las categorías en que se agrupan, para esta investigación, los factores de madurez de acuerdo con los resultados de la primera etapa de entrevistas y la revisión de la literatura.

Desarrollo del tamaño de la muestra

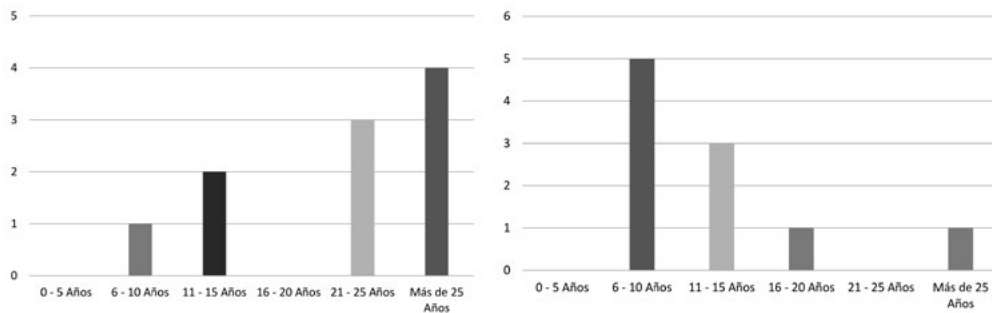
En el desarrollo de la investigación cualitativa, Nesensohn (2014) se refiere a Kvale(2007), quien sugiere que, debido al tiempo y los recursos disponibles para aplicar este método, se acepta que se realicen entre cinco y veinticinco entrevistas. Es así como en este rango se enmarcó la consecución de la información para esta etapa, según esta recomendación.

Recolección de información

Se entrevistó a diez profesionales, dos expertos en Colombia y ocho en Santiago de Chile durante la estancia de investigación en la Universidad Católica de Chile, en el Centro de Excelencia en Gestión de la Producción, Gepuc; tres de ellos miembros del grupo de trabajo colaborativo como representantes de las empresas que lo integran, además de que son los líderes de los procesos LC en ellas, y tres consultores de Gepro. El 80% de los participantes son ingenieros civiles, lo cual confirma que son estos profesionales quienes están siendo líderes de los procesos de implementación y desarrollo de LC en las organizaciones, Figura 1.10. De estos participantes, un 40% corresponde a profesores universitarios que realizan también actividades de investigación en temáticas LC e investigación en LC, un 30% a consultores, un 20% a profesionales practicantes, y un 10%, un miembro de la alta dirección de una de las organizaciones consultadas, Figura 1.11.



*Figura 1.10. Profesionales participantes etapa II y
Figura 1.11. Ocupación de los participantes etapa II*



*Figura 1.12. Experiencia general de participantes y
Figura 1.13. Experiencia en LC participantes
entrevistas etapa II entrevistas etapa II*

El 70% de los participantes cuenta con una experiencia general en construcción de más de veinticinco años, de tal manera que el total de los participantes está por encima de los seis años de experiencia, Figura 1.12. El 80% de ellos con experiencia en LC entre seis y quince años, consistentes también con el tiempo en que se viene desarrollando LC en estos países. Un profesor investigador con experiencia de entre dieciséis y veinte años en Colombia y un profesor investigador con experiencia de más de veinticinco años en Chile, Figura 1.13.

Etapa III. Entrevista principal para la identificación de los elementos de madurez

Con la entrevista principal se exploraron aspectos que permitieron identificar las características que evidencian la madurez de LC en la GPC, así como elementos asociados con la madurez. Se contó con la participación de veintinueve profesionales y expertos con experiencia en LC: tres en Colombia, doce en Chile, diez en Brasil y cuatro en Perú. Esta entrevista cuenta con dieciséis preguntas, todas ellas enfocadas a la exploración de la madurez

de LC con referencia a elementos asociados con la madurez en las tres categorías propuestas con base en las referencias bibliográficas y entrevistas anteriores: *personas, sistema de producción y soporte de la organización al proceso de producción*.

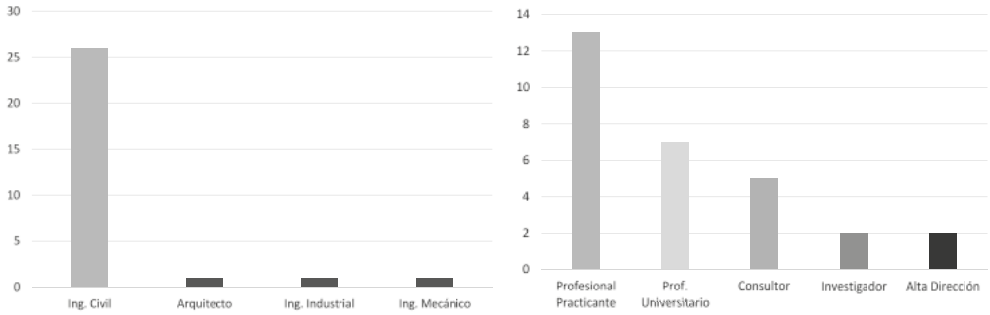
Con los resultados de estas entrevistas y la revisión de las referencias académicas, se identificaron 425 elementos asociados con la madurez y que fueron descritos para ser agrupados en las tres categorías mencionadas. Estos elementos son objeto de análisis en el Capítulo 4.

Desarrollo del tamaño de la muestra

De igual manera, como en el punto anterior, se atendió la recomendación de Nesensohn de seguir a Kvale(2007) y realizar entre cinco y veinticinco entrevistas. Sin embargo, teniendo en cuenta que se visitarían cuatro países de Suramérica: Chile, Brasil, Perú y Colombia, para la recolección de información, y que los profesionales con experiencia serían contactados por medio de los grupos de investigación que alojarían a la investigadora, se previó que se aplicarían como mínimo tres entrevistas en cada país para obtener una muestra de 12 entrevistas.

Recolección de información

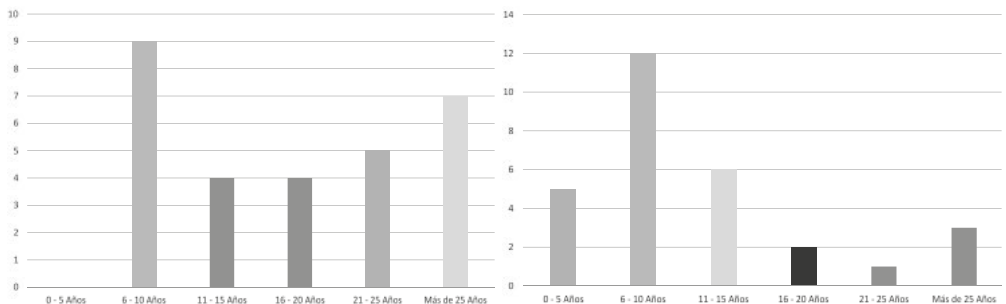
En una segunda, tercera y cuarta pasantías de investigación se realizaron las entrevistas de la etapa III. Se realizaron tres entrevistas en Colombia, antes del inicio de la segunda pasantía de investigación que se desarrolló en Chile. Allí, de nuevo con Gepuc y con la estrecha cooperación de Gepro, con su apoyo y recomendación, se realizaron doce entrevistas. La tercera pasantía de investigación se llevó a cabo en la Universidad Federal Rio Grande Do Sul, en el Núcleo Orientado para la Innovación de la Edificación, Norie; en esta ocasión con la coordinación de la dirección del grupo de investigación se contactaron diez profesionales. Finalmente, la cuarta pasantía se adelantó en la Universidad Católica de Perú, en Lima, con la colaboración del Grupo de Investigación Getec, cuyo director también apoyó la coordinación de los contactos para las entrevistas con cuatro participantes. El 90% de los participantes son ingenieros civiles; 52% de los participantes son profesionales practicantes, incluido un miembro de la alta dirección de una importante constructora; un 31%, profesores universitarios e investigadores en LC y un 17%, consultores, Figuras 1.14 y 1.15.



**Figura 1.14. Profesionales participantes etapa III y
Figura 1.15. Ocupación de los participantes etapa III**

El 24% de los participantes cuenta con una experiencia general en construcción de más de veinticinco años, de tal manera que el total de los participantes está por encima de los seis años de experiencia, Figura 1.16. El 79% de los participantes cuenta con experiencia en LC de entre seis y quince años, consistentes también con el tiempo en que se viene desarrollando LC en estos países. Un profesor investigador con experiencia de entre dieciséis y veinte años en Colombia, un profesor investigador de entre veinte y veinticinco años en Brasil, y dos profesores investigadores en Brasil y un profesional practicante en Chile con experiencia de más de veinticinco años, Figura 1.17.

En términos generales, se puede verificar, con la información presentada de las personas que participaron de estas etapas de consultas, que cuentan con la idoneidad para que sus respuestas de manera individual y colectiva puedan ser consideradas con validez para el estudio realizado.



**Figura 1.16. Experiencia general participantes etapa III y
Figura 1.17. Experiencia en LC participantes etapa III**

Encuesta

Los participantes fueron seleccionados de acuerdo con su trayectoria en investigación, implementación y desarrollo de LC. Se invitó a cada una de las personas que fueron entrevistadas en las etapas previas, a académicos, investigadores y practicantes LC alrededor del mundo. En general, los participantes fueron seleccionados teniendo en cuenta publicaciones en revistas de alto impacto que fueron estudiadas en la revisión de literatura a lo largo de esta investigación. También fue de mucha ayuda, para identificar profesionales con amplia trayectoria en investigación, implementación y práctica LC, la red profesional LinkedIn (www.linkedin.com) en la que se identificaron los perfiles de destacados profesionales LC y, por medio de ellos, algunos de sus colegas que han sido coautores en investigaciones en LC. De igual manera, los artículos publicados en las memorias de los congresos anuales del IGLC fueron de mucha ayuda.

Se envió un mensaje de invitación por correo electrónico a cada participante seleccionado. En total fueron 265 expertos alrededor del mundo, a quienes se convocó con la precaución de informarles que se trataba de una participación anónima; sin embargo, para efectos de la custodia de la información, cada encuesta está debidamente identificada. En ese mensaje se les anunciaba que se enviaría otro con el enlace para acceder a la encuesta, de tal manera que si aceptaba, luego de leer el mensaje de invitación, la encuesta estaría disponible.

Con seis de los expertos internacionales se tuvo un intercambio más cercano; ellos se interesaron en conocer más a fondo la investigación para luego dar respuesta a la encuesta. Con uno de ellos la investigadora sostuvo una reunión personal con ocasión de su visita a Colombia en el transcurso de la investigación; reunión que abordó cada una de las preguntas del cuestionario y aportó una valiosa retroalimentación por parte del experto con experiencias particulares: Con cuatro de los expertos se sostuvo una conversación por medio del correo electrónico, en la cual preguntaron por el alcance de la investigación e hicieron una generosa contribución a manera de recomendaciones y, con uno de ellos, se estableció una amplia discusión por videoconferencia con respecto a la ingobernabilidad de los proyectos de construcción, discusión que también aportó a la construcción del modelo.

Cinco de los expertos invitados a la consulta tuvieron la deferencia de escribir a la investigadora expresando que no estaban interesados en participar en la consulta, y algunos aportaron sus razones para no hacerlo: “Encuentro que las encuestas de esta naturaleza tienden a no arrojar resultados perspicaces y toman, por supuesto, mucho tiempo”, una percepción sobre la utilidad de las encuestas y una encuesta larga; “Muchas gracias por su correo elec-

trónico, pero no soy un fan de la construcción Lean. Por lo tanto, no puedo responder tu encuesta”, se trataba de un experto en temas de gestión de construcción y procesos de mejoramiento de la eficiencia de la producción, una identificación de experto no en el ámbito LC; “Comencé a completar la encuesta, pero me detuve cuando me di cuenta de que no entendía la base para calificar los diferentes aspectos, atributos, etc. Con quizás la excepción de la evaluación comparativa externa, todos son parte del progreso en un viaje sin complicaciones. Uno no es más importante que el otro...”, una valiosa recomendación a partir de esta observación; “Siempre estoy listo para ayudar a los estudiantes de Lean Construction en su investigación, pero odio los cuestionarios”, una percepción personal sobre las encuestas. Todas estas razones son consideraciones importantes para tener en cuenta en investigaciones futuras, para diseñar instrumentos más eficientes para la recolección de información y lograr involucrar la opinión de estos expertos.

La encuesta fue atendida por 111 profesionales familiarizados con LC. El mayor grupo está compuesto por ingenieros civiles, un 85%, Figura 1.18, lo cual muestra que estos profesionales están asumiendo la tarea del desarrollo de LC en las organizaciones de construcción como parte del alcance de la profesión de ingeniero civil; de igual manera, arquitectos e ingenieros industriales también hacen parte de los profesionales relacionados con LC. Se presenta una variedad relacionada con la ocupación de los participantes, un grupo que representa el 29% corresponde a profesores universitarios e investigadores, información que relaciona la formación académica en LC desde las instituciones universitarias; le siguen los profesionales practicantes con un 27% quienes trabajan en campo, los consultores con un 21% que apoyan los procesos de implementación y crecimiento LC, los miembros de la alta dirección con un 11 % que promueven y apoyan los procesos LC y aquellos participantes dedicados exclusivamente a procesos de investigación con un 11% de la muestra, Figura 1.19.

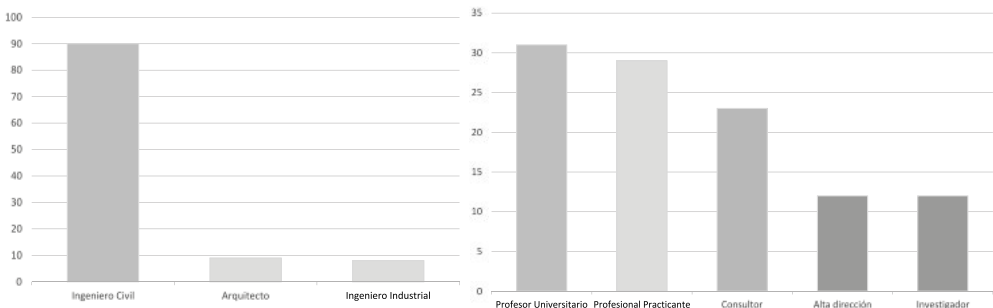


Figura 1.18. Profesiones de los expertos
Figura 1.19. Ocupación de los expertos

Se recibieron respuestas de participantes en cuatro continentes y diecinueve países. Tiene una alta participación el grupo de profesionales colombianos con un 37% con respecto del 63% de los participantes internacionales. En la Figura 1.20 se identifican los países donde se encuentran ubicados los participantes y la cantidad de respuestas por cada país.

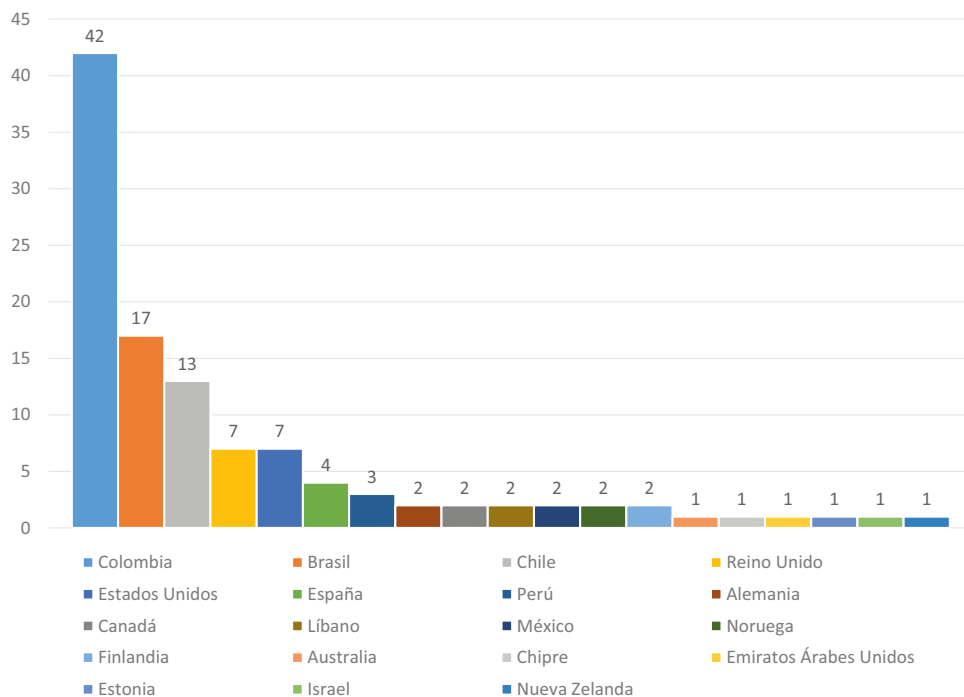
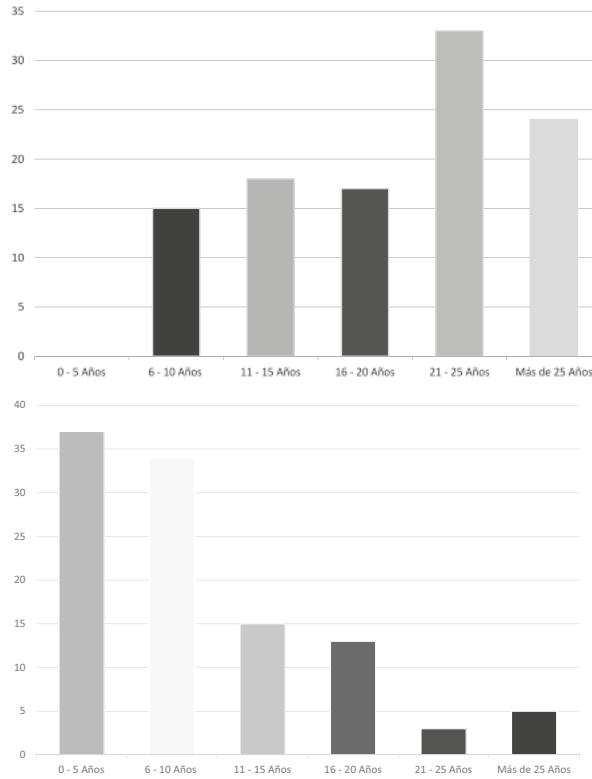


Figura 1.20. Ubicación de los participantes en la encuesta.

Los participantes cuentan con experiencia general mayor de seis años, y son personas conocedoras de las actividades de producción en la construcción. El 78% de los participantes cuenta con experiencia en la construcción de entre seis y veinticinco años y un 22% con experiencia general superior a veinticinco años, Figura 1.21. El 66% de los participantes cuenta con experiencia en LC de entre cuatro y diez años (en el rango de cero a cinco años, el menor número de años de experiencia LC reportado es de cuatro años), si se amplía el rango de observación se puede evidenciar que el 93% corresponde a profesionales con experiencia de entre cuatro y veinte años. Profesionales LC de entre veintiuno y más de veinticinco años de experiencia en LC corresponden al 7% de los participantes, Figura 1.22.



**Figura 1.21. Experiencia general de los participantes de la encuesta y
Figura 1.22. Experiencia en LC de los participantes de la encuesta**

Estrategia de validación y fiabilidad

La validación en la investigación se llevó a cabo en varios momentos, en los cuales se buscó demostrar la veracidad de los resultados para la obtención de una herramienta confiable para el propósito previsto. Un primer momento estuvo relacionado con la obtención de la información, la disponibilidad de una muestra adecuada de participantes para cada método de recolección de información; en un segundo momento, la validación de los datos colectados por medio la verificación de la robustez del modelo SEM y la convergencia de la simulación que se realiza para la identificación de los perfiles de madurez.

LA PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y SU RELACIÓN CON LEAN CONSTRUCTION

RESUMEN

En la primera sección de este capítulo se presentan conceptos relacionados con la producción de proyectos de construcción; en la segunda sección se discute sobre la integración de Lean en la GPC para fundamentar algunos de los elementos conceptuales que se utilizan para la construcción del modelo. Parte de esta fundamentación corresponde con el estudio de los principios de la producción Lean y LC para sustentar el sistema de gestión de la producción Lean Construction. En la tercera sección se presentan las iniciativas de evaluación de Lean Construction, como resultado de un riguroso estudio de referencias bibliográficas, las cuales demuestran el estado del arte en la temática de interés.

En general, Lean busca que las personas en el sistema de producción participen en la construcción de una cultura de mejoramiento continuo, con el fin de eliminar los desperdicios y desarrollar su actividad productiva con enfoque en el cliente. De igual manera, propicia el desarrollo de una organización que cuida de las personas que la conforman. Se sugiere la inclusión de cuatro principios para LC, identificados en la investigación y se presenta una definición para LC a partir de la necesidad de contar con ella para la investigación en la evolución de LC en la GPC. Adicionalmente, se describen los aspectos relacionados con la producción en construcción, la cual debe ser vista como un proceso sistémico de producción que, a diferencia de la manera tradicional en que esta se lleva a cabo en cualquier contexto, permi-

ta incrementar la productividad para mejorar los resultados del negocio por medio de un alto nivel de cumplimiento de la oferta de valor.

Definiciones

Definición de proyecto

Según el PMI (2008), un proyecto se define como: “Un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único”; tiene un principio y un final definido y representa un volumen de trabajo que requiere un tipo de organización específica. No es un trabajo rutinario, no sigue los procedimientos normales porque hay algo que lo hace único. El proyecto termina cuando se logran sus objetivos, o cuando los objetivos no son cumplidos o cuando las necesidades que le dieron origen no existan. más.

Definición de producción

Es el proceso que aporta valor agregado por fabricación y suministro de bienes y servicios económicos para el consumo. Es la actividad principal de cualquier sistema económico que está organizado precisamente para producir, distribuir y consumir los bienes y servicios necesarios para la satisfacción de las necesidades humanas. (Construcción de la definición basada en Sickles y Zelenyuk, (2019)).

La producción de proyectos de construcción

Entender el proyecto de construcción como un sistema de producción implica identificar las características que lo diferencian de un proyecto de manufactura; reconocer los elementos relacionados con el proceso y sus salidas, así como establecer la estrategia de producción para alcanzar las metas previstas.

El proyecto de construcción, de manera tradicional, se desarrolla en dos etapas: elaboración del producto y uso del producto. Estas etapas contienen las fases en las que se va elaborando el producto: factibilidad, estructuración para construcción, construcción, arranque y operación, mantenimiento y sostenibilidad y eliminación.

La manera tradicional en que se ha llevado a cabo la etapa de elaboración del producto es secuencial y a lo largo de la línea de vida del proyecto. Esto ha promovido el fraccionamiento del proyecto, ya que una fase se desarrolla independiente de la otra y entrega información a su sucesora con un bajo nivel de integración, lo que favorece la presencia de problemáticas asociadas principalmente con la gestión de la información y la calidad del producto que pasa a la siguiente fase, lo que comúnmente ocasiona un alto nivel de desperdicios, principalmente, los asociados con reprocesos y esperas.

De acuerdo con Koskela (2000), la teoría de transformación-flujo-valor (TFV) de la producción sugiere que los tres elementos: la transformación

de entrada a la salida, el flujo y la generación de valor, deben ser utilizados simultáneamente para conducir una estrategia de producción que logre su articulación de manera eficiente. Koskela propone en 1992 la aplicación de la filosofía Lean en el sector de construcción con la expectativa de ser una alternativa que contribuya a mejorar la eficiencia del proyecto de construcción de manera particular y, a partir de esta, la mejora de la productividad del sector. Así mismo, Ballard (2000) propone una forma de gestionar el proyecto de construcción con un enfoque Lean Construction; este enfoque se extiende a través de todas las fases del proyecto hasta la postocupación y permite una visión holística del mismo, el Lean Project Delivery System (LPDS).

LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

La gestión del proyecto es el proceso mediante el cual se planifica, dirige y controla la ejecución de un proyecto aplicando conocimientos, habilidades, técnicas y herramientas en cada una de sus actividades para alcanzar sus objetivos, entre otros, tiempo, costo y calidad en la satisfacción de las necesidades y expectativas de sus beneficiarios. La planificación consiste en determinar QUÉ debe hacerse, CÓMO debe hacerse, QUIÉN es el responsable de hacerlo y POR QUÉ (American Management Association). La ejecución, el control y seguimiento permiten mantener el proyecto alineado con sus objetivos midiendo constantemente su progreso. Es así como una adecuada gestión de un proyecto:

- a. identifica los requisitos y los interesados,
- b. establece objetivos claros y alcanzables,
- c. gestiona a los interesados para cumplir los requisitos y generar los entregables, y
- d. identifica y equilibra las restricciones que se oponen a la ejecución del proyecto.

La gestión de producción de proyectos de construcción es la práctica que permite asegurar que las acciones de construcción se lleven a cabo de manera eficiente y efectiva. Se refiere a la gestión de los procesos físicos de construcción e incluye la coordinación, administración y gestión de recursos, desde su concepción hasta su terminación, así como también a los procesos de comunicación, y se desarrolla a través de diferentes estados en el ciclo de vida del proyecto (Windapo, 2013).

De acuerdo con Nam y Tatum (1988) y Koskela (1992), el proyecto de construcción cuenta con características que lo hacen un sistema de producción particular que puede ser diferenciado del propuesto por Miltenburg (1995); estas características corresponden a:

- un proyecto de construcción es único en su tipo,
- se elabora en el sitio de entrega,
- los recursos fluyen a través de él durante su elaboración,
- cada producto configura una cadena de suministro específica y
- a planificación, ejecución y control es particular para cada proyecto.
- Se produce en el sitio en el que operará,
- establece una organización temporal para su construcción,
- gestión individual de la cadena de suministro,
- la unidad de producción pasa a través del producto y no al contrario como sucede en manufactura,
- es requisito realizar actividades predecesoras para completar las tareas aguas abajo.

A diferencia de otras industrias, en construcción los productos son grandes, se construyen en el sitio y, por lo general, son únicos en su tipo, aunque consuman recursos del mismo tipo que otras industrias: tiempo, dinero, mano de obra, equipos y materiales. De acuerdo con Botero (2000), algunas de las características que hacen de la construcción una industria diferente a manufactura son:

- actividad económica predominantemente cíclica, afectada por la coyuntura macroeconómica,
- poca uniformidad en los materiales utilizados,
- baja estandarización de procesos de producción,
- producción de un solo producto, productos únicos,
- los productos son fijos en el sitio de uso, los operarios realizan los movimientos alrededor y a través del producto,
- uso de mano de obra masiva, poca capacitación, con alta rotación y baja remuneración, bajo sentido de pertenencia y baja motivación,
- prácticas de construcción arraigadas y bajo interés en uso de nuevas tecnologías,
- bajo grado de precisión frente al cumplimiento oportuno de objetivos,
- el producto se elabora expuesto al medio ambiente, así que el clima tiene un alto impacto en su producción,
- el ciclo de producción y el de uso del producto son largos, de tal manera que el cliente adquiere pocos productos durante su vida.

El objetivo del proyecto de construcción es la producción de un activo físico: edificios o infraestructura (Elbeltagi y Eng, 2009). Así que una gestión de proyectos de construcción exitosa debe lograr ejecutar los proyectos en menos tiempo, con menos desperdicios, garantizar el uso económico de los recursos, obtener productos de alta calidad con el mayor valor agregado posible de acuerdo con el proceso de producción, con menor o ningún accidente de trabajo o fatalidad, una mayor satisfacción del cliente, así como la obtención de productos cada vez más sostenibles y amigables con el ambiente.

Los proyectos inician con un objetivo requerido que debe ser materializado por el equipo del proyecto y, a medida que el equipo avanza en las fases del proyecto va aprendiendo sobre el mismo y conduciendo un proceso de redefinición de los objetivos establecidos. La gestión de proyectos de construcción es una disciplina que separa las funciones propias de gestión de un proyecto de las funciones de diseño y ejecución. “La planeación, coordinación y control general del proyecto desde la concepción hasta su finalización que reúne los requerimientos del cliente para producir un proyecto funcional y financieramente viable que debe ser completado en el tiempo y costos planeados y de acuerdo con los estándares de calidad requeridos” (Chartered Institute of Building, 2002).

Las empresas de construcción son cada vez más conscientes de la necesidad de cambios empresariales que las conduzcan hacia estándares más exigentes de competitividad. Esta necesidad promueve la búsqueda de metodologías de gerencia de proyectos más efectivas para involucrar cambios en la organización que conduzcan a la mejora de su eficiencia.

Una adecuada gestión de proyectos y un sistema de producción más eficiente contribuyen a aumentar la productividad. Con este interés en el desarrollo en la gestión de proyectos se crearon asociaciones encargadas de recopilar y difundir metodologías y mejores prácticas en proyectos como el IPMA (International Project Management Association), PMI (Project Management Institute), PMF (Project Management Forum), Prince, Goal Directed Project Management, GDPM, entre otras. La creación de estas organizaciones ha permitido desarrollar estándares internacionales que adoptan y exigen las mejores prácticas en gestión de proyectos para aumentar el cumplimiento de las metas del proyecto en términos de plazo, alcance, calidad y costos, principalmente.

En la gestión tradicional de proyectos, el proyecto se va elaborando gradualmente a lo largo de su ciclo de vida, lo que permite al equipo del proyecto conocerlo en profundidad en forma progresiva y desarrollar habilidades concretas para dirigirlo con un mayor nivel de detalle. Esta forma de gestión no proporciona los mejores resultados, por lo que se han buscado

nuevas formas de gestión más ágiles para abordar los problemas que se presentan principalmente debido al fraccionamiento del proyecto en cada una de las fases de ejecución.

Según PMI (2004), la gestión del proyecto se debe llevar a cabo a lo largo de su vida en cada una de sus fases: inicio, planificación, ejecución, seguimiento, control y cierre, desarrollando procesos específicos en cada una de ellas. Para llevar a cabo una adecuada gestión de proyectos, una organización debería contar con un sistema de gestión de proyectos el cual debe estar conformado, entre otros, por un conjunto de subsistemas como son: de planificación, de información, de control, de producción, de organización, de cultura organizacional y de gestión de personal.

METODOLOGÍAS DE GESTIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Son varios los enfoques en gestión de proyectos que se han desarrollado, todos ellos abordan temas neurálgicos para la búsqueda del éxito del proyecto, como son la planeación, ejecución y control, la relación de la organización con el proyecto y la motivación de las personas, entre otros. En cualquier caso, un sistema de gestión debe considerar el cumplimiento de los objetivos, los costos, tiempos, así como la asignación y cumplimiento de responsabilidades de cada participante.

La gestión de proyectos como disciplina tuvo un rápido crecimiento a lo largo del siglo XX, pasando de conceptos a una disciplina con el desarrollo de diferentes metodologías. En 1969, se fundó el Project Management Institute (PMI) con el propósito de asociar a los profesionales de gestión de proyectos en todo el mundo para colaborar en el desarrollo de las mejores prácticas en gestión de proyectos. PMI desarrolló la *Guía para la gestión de proyectos* (PMBOK³), que ofrece los estándares del PMI para proyectos en todo el mundo. El PMBOK no es una metodología en sí, promueve los elementos clave que las buenas metodologías deben contener, la integración, el alcance del proyecto, tiempo, costo del proyecto, la calidad del proyecto, los recursos humanos, las comunicaciones del proyecto, los riesgos del proyecto y las adquisiciones. Una revisión de la literatura realizada por McClinton (2007) sobre metodologías de gestión de proyectos incluye: Ágil, Prince 2, Six Sigma, System Development Life Cycle (SDLC), y Waterfall (gestión tradicional de proyectos).

³ *Guide to the Project Management Body of Knowledge* (PMBOK por su sigla en inglés), (PMI, 2004).

La gestión de proyectos se apoya en herramientas que permiten la planificación y control de los recursos del proyecto, entre ellas los enfoques tradicionales, innovación en métodos de gestión e innovación en procesos de gestión (Guo, 2008):

- **Enfoques tradicionales:** Diagrama de Gantt, Pert, Cadena Crítica, Valor Ganado, Look-ahead Schedule, programación lineal o técnicas de línea de balance y otros con ayuda de *softwares*.
- **Innovación en métodos de gestión:** Entrega Diseño-Construcción (D-B), Total Quality Management, Gestión de la Cadena de Suministro, Lean Manufacturing, Project Management Institute (PMI), Prince2®, Spice, Integrated Project Delivery (IPD), Lean Project Delivery System (LPDS).
- **Innovación en procesos de gestión:** planificación de procesos automatizados, Planificación de procesos basados en simulación, planificación de procesos basados en visualización, optimización de procesos de planeación de construcción.

La productividad y la producción en construcción

Definición de productividad

La productividad es una medida de qué tan eficientemente se hace uso del trabajo y el capital para producir valor económico (Galindo y Ríos, 2015).

El término productividad se utiliza de manera genérica para denominar la relación entre los resultados de un proceso productivo y los recursos utilizados en él. Sin embargo, la productividad es más que el simple resultado de la “velocidad” a la que se producen los bienes de acuerdo con esta relación. Un indicador de alta productividad considera que se produce mucho valor económico con poco trabajo o poco capital. De esta manera, aumentar la productividad implica producir más con los mismos recursos o menos. Así, la productividad de un sector es la consecuencia de la productividad individual de las empresas en él, la cual está asociada con la productividad de sus proyectos.

Según el *Diccionario de la lengua española* (2020), la productividad es la “Relación entre lo producido y los medios empleados, tales como mano de obra, materiales, energía, etc.”. A partir de esta definición el concepto de productividad se puede abordar con al menos tres enfoques:

- las condiciones que propician el ser productivo, las capacidades para ser productivo,

- la eficiencia en el uso de los recursos involucrados en el proceso, y
- un indicador de salida relacionado directamente con un recurso en un periodo definido.

Según el uso genérico de la relación de productividad, y dependiendo del sector o actividad económica, se define la productividad de acuerdo con el recurso más sensible utilizado en el proceso de producción. En sectores como la construcción, que es un sector intensivo en personal, es la mano de obra el recurso productivo dominante (Yi y Chan, 2014) y la productividad depende en gran proporción del esfuerzo y el desempeño de las personas (Jarkas, 2010).

Aunque la concepción de los sistemas productivos en la industria de la construcción y en la industria manufacturera parte de la misma caracterización global dada por la secuencia insumos-transformación-resultado, la industria de la construcción presenta características de estructura y flujo que la diferencian de la industria manufacturera. Algunos enfoques de planificación y control de proyectos en construcción son vistos como una adaptación de los enfoques de manufactura. Sin embargo, las diferencias entre la forma en que se realizan las operaciones en estos dos sectores abren posibilidades para estudiar los proyectos de construcción con criterios propios de manufactura comenzando por identificar los entornos.

ENTORNOS DE PRODUCCIÓN

Un objetivo de la producción es ser cada vez mas ágil para cumplir con los requerimientos de los clientes en calidad, tiempo y cantidad. El uso adecuado de la estrategia de planificación y producción contribuye con este objetivo, además de procurar la minimización de desperdicios relacionados con la producción misma. Sin embargo, es muy común que los productos no se ajusten eficientemente a las estrategias de producción, o no haya una articulación adecuada entre la producción y las ventas sobre el entorno de producción. Entonces, para contar con el producto correcto, en calidad y cantidad, toma relevancia el estudio cuidadoso del entorno de producción en el cual se desarrolla la producción del proyecto de construcción.

En construcción, el punto de la cadena de valor donde el producto está vinculado a un cliente específico se denomina punto de penetración del pedido o punto de desacople (OPP por su sigla en inglés). Este punto es importante al momento de definir la estrategia de negocio en la cual se mueve

la organización (Olhager, 2003), precisamente para permitir la intervención del cliente en el proceso de producción.

Los entornos de producción están relacionados con las operaciones de fabricación que permiten obtener productos altamente estandarizados, o una amplia gama de productos. Estos entornos se identifican en la Figura 2.1, con la terminología original en inglés. En este sentido, en la medida en que la intervención del cliente sea más tardía, se van obteniendo productos más estandarizados. Por el contrario, si su intervención es más temprana se obtienen productos más especializados, hechos a la medida de sus necesidades. Estos entornos son:

Engineer to Order (ETO). Diseño bajo pedido

Para volumen bajo de producto a fabricar, baja estandarización y producto a medida. Atiende proyectos con un alto nivel de personalización en los que el cliente participa desde su concepción. Los productos requieren de un diseño único, o nuevos materiales.

Su línea de tiempo coincide con la del proyecto y el OPP se ubica al inicio del proyecto en el punto A, Figura 2.3. Este cliente ejerce influencia en el proyecto desde su concepción.

Por lo general, este tipo de proyectos se dirige a estratos socioeconómicos altos o proyectos especiales como fábricas u obras de infraestructura. En este tipo de proyectos, es común que el OPP se ubique también desde las primeras fases debido a que se permite un alto nivel de personalización desde la planificación del proyecto, por lo cual el cliente-comprador se integra tempranamente.

Make to Order (MTO). Fabricación bajo pedido

Para la fabricación de un producto por pedido, volúmenes bajos o medios con baja estandarización. Se permite al cliente comprar productos personalizados según sus especificaciones. Solo se fabrica el producto final una vez que el cliente realiza el pedido.

La estructura base es un entorno de fabricación bajo pedido en construcción o Make to Order (MTO). El OPP se ubica en el punto D, Figura 2.3. En este entorno se ofrecen una o varias configuraciones básicas a partir de las cuales el cliente-comprador ordena la que prefiere a partir de las diferentes alternativas arquitectónicas, estructurales y de acabados.

Assemble to Order (ATO). Ensamble bajo pedido

Para la fabricación de un producto por pedido, volúmenes bajos o medios con baja estandarización, ensamble a la salida. Los productos pedidos por

los clientes se producen rápidamente y se personalizan hasta cierto punto. Las partes básicas del producto se fabrican, pero no se ensamblan hasta que se recibe el pedido.

Cuando el cliente-comprador decide entre opciones de personalización basado en una restringida oferta de opciones, por lo general de acabados, se define un ensamble bajo pedido en construcción o Assemble to Order (ATO). En este entorno, el OPP se ubica entre los puntos D y E, Figura 2.3. De esta forma es entre los puntos E y F, Figura 2.3 donde se realiza el ensamble de acuerdo con la oferta de acabados seleccionada.

Make to Stock (MTS). Fabricación para almacenar

Para volumen medio de productos a fabricar, mediana estandarización y poca variedad de productos. Los productos se elaboran con estándares específicos y el cliente solo participa para el recibo del producto, no hay disponibles opciones de personalización. Esta es la estrategia de producción tradicional, la producción y el inventario se ajustan a los pronósticos de la demanda del cliente.

Los proyectos de vivienda de interés social (VIS) o de vivienda de interés prioritario (VIP) tienen bajo o nulo nivel de personalización; esto configura una fabricación para almacenar en construcción o un Make to Stock (MTS). El proyecto se desarrolla con base en conceptos arquitectónicos mínimos. Cuando se construye el total de unidades del proyecto, estas se entregan a los clientes-compradores; así el OPP se ubica al final del proceso de producción, en el punto G, que es el punto de entrega al cliente-comprador.

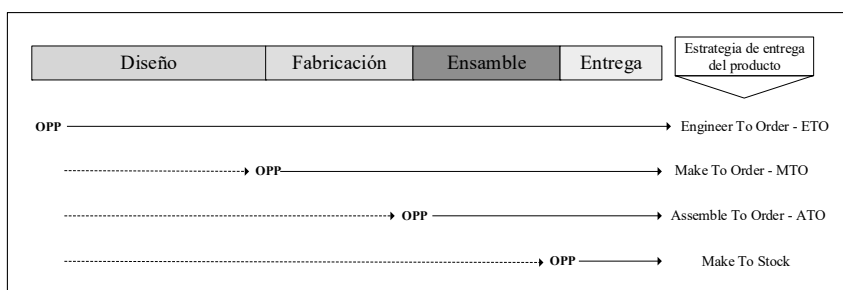


Figura 2.1. Estrategias de producción y su relación con los puntos de penetración del pedido (OPP).

Fuente: elaboración propia basada en Olhager (2003).

Sistemas de producción

Los sistemas de producción son un conjunto de procesos, procedimientos, métodos y/o técnicas que permiten la obtención de bienes y servicios

gracias a la aplicación sistemática de decisiones que tienen como función la elaboración de productos para incrementar el valor, al satisfacer necesidades específicas del cliente (Carro y González, 2012). El sistema de producción más apropiado para una organización es aquel que le permite proveer los resultados de producción requeridos por el cliente: costo, calidad, rentabilidad, entrega, flexibilidad e innovación (Miltenburg, 1995). Estos resultados materializan el concepto de valor al considerar los requerimientos del cliente, entendiendo como cliente el conjunto de beneficiarios del proyecto: inversionista, comprador, medioambiente y sociedad, principalmente. Se distinguen siete sistemas de producción que se han agrupado en dos categorías (Miltenburg, 1995):

- **Sistemas tradicionales:** Aquellos que consideran rangos de variedad y volúmenes de producto, partiendo del sistema Job Shop, mediante el cual se fabrican muchos productos y pocos volúmenes hasta flujo continuo con producción de uno a pocos productos en volúmenes muy elevados. Estos sistemas son:
 - Proyecto
 - Flujo en lotes
 - Flujo en línea acompasado por operarios
 - Flujo en línea acompasado por el equipo y
 - Flujo continuo.
- **Nuevos sistemas:** Estos sistemas consideran la producción de volúmenes medios y altos de producto con flujos más ordenados de producción.
 - Sistema de Fabricación Flexible (FMS), para producir muchos productos y altos volúmenes.
 - Justo a Tiempo (JIT), para producir muchos productos y bajos o medios volúmenes.

**EL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN:
FLUJO SECUENCIAL DE ACTIVIDADES ACOMPASADO
POR LA UNIDAD DE PRODUCCIÓN**

En la clasificación del sistema de producción, según Miltenburg (1995), la construcción se identifica como un sistema de producción por “proyecto”. Un proyecto se caracteriza por ser elaborado a partir de un flujo disperso, baja estandarización, producto único y a la medida. La Figura 2.2, la matriz de producto-proceso, presenta de manera gráfica la interacción entre los distintos tipos de sistemas productivos en relación con los volúmenes

de producción y el flujo de materiales. Aquí las configuraciones van desde procesos artesanales con flujos dispersos hasta procesos automatizados en flujo continuo.

Un proyecto de construcción puede lograr un flujo de actividades de construcción más ágil, en el cual es la unidad⁴ de producción la que controla el ritmo de ejecución. En el desarrollo del proyecto de construcción, las fases del proyecto y las actividades en cada una de ellas se llevan a cabo de manera secuencial, de tal manera que el producto se va transformando paulatinamente, de manera que al final de cada fase se obtiene un estado específico del producto para pasar a la siguiente fase.

Aunque el proyecto de construcción se puede clasificar en la primera categoría de acuerdo con Miltenburg (1995), las características anteriormente descritas ofrecen elementos para precisar con más detalle su clasificación. La producción de los proyectos de construcción sigue un proceso conformado por las fases necesarias para su elaboración que se repiten de manera similar para otros proyectos. Para el proyecto de construcción no es correcto describir el flujo de materiales como disperso, esto sugiere desorden, y el flujo del proyecto de construcción no es precisamente desordenado, el orden lo establece la secuencia lógica de construcción establecida con ayuda del programa de construcción. Así que es más conveniente referirse a un flujo localizado y distribuido en unidades funcionales. El flujo distribuido mejora la idea de orden según un sistema de planificación y control que garantice la realización de la actividad en el momento justo en que se requiere de acuerdo con el programa de trabajo y las actividades precedentes.

Con base en lo anterior, la investigación caracterizó el SPPC como un ***flujo secuencial de actividades acompasado por la unidad de producción***, haciendo que esta forma de desarrollo de las actividades del proyecto integre conceptos de Just inTime (JIT).

El flujo es secuencial debido a que las actividades del proyecto se realizan una a continuación de la otra, y en cada fase el equipo de trabajo logra transformaciones progresivas del producto, de tal manera que se obtenga una mejora de productividad que hace que se pase gradualmente de volumen bajo a uno medio o alto de actividades, en la medida en que el proceso de transformación sea cada vez más estandarizado. Esto conduce la producción a través de las consideraciones de los entornos de producción teniendo en cuenta el volumen de actividades y el nivel de estandarización.

⁴ En proyectos de construcción la unidad de producción se refiere al conjunto de personas y de medios materiales organizados con la finalidad de obtener bienes o servicios.

El ciclo de vida de la gestión tradicional del proyecto de construcción

El ciclo de vida de la gestión tradicional del proyecto está dividido en fases; algunas de ellas, dependiendo del tipo de proyecto, presentan un grado mayor o menor de iteración para completar su entregable. Según Forcada (2005), se distinguen dos grandes fases en un proyecto: planificación y ejecución e implementación y, dependiendo del tamaño, complejidad, riesgo y sensibilidad del proyecto, estas fases pueden estar divididas subfases, especialmente en los proyectos de construcción, los cuales cuentan con una gran cantidad de actividades para su ejecución que requieren diversos rangos de especialización. Los procesos requeridos para el proyecto exigen el desarrollo de una estructura secuencial segmentada en la que una fase requiere del producto de la anterior para avanzar.

El esquema general de desarrollo de un proyecto de construcción obedece a una demanda del mercado. En la fase de planeación, se consideran varias posibilidades de solución, las cuales se evalúan desde el punto de vista de la factibilidad tecnológica y económica para seleccionar la mejor alternativa para el proyecto. Se evalúan también los posibles escenarios financieros con respecto del tiempo requerido y el flujo de dinero disponible para su terminación. Una vez el diseño del proyecto está claramente definido, se elaboran los diseños complementarios, se obtienen los costos de construcción y la línea base de programación de la obra de construcción. Durante la construcción, la entrega de materiales y los procesos de construcción son cuidadosamente planeados y controlados. Después de la terminación de la construcción, se lleva a cabo un corto periodo de pruebas para que el activo físico sea ocupado. Finalmente, se pone en funcionamiento y se desarrollan actividades de mantenimiento durante la vida útil del bien hasta llegar a la fase de demolición.

El problema del fraccionamiento del proyecto de construcción ha sido abordado por Ballard (2000), quien propuso una forma integrada de gestionar el proyecto por medio del Lean Project Delivery System (LPDS), el cual se plantea como una filosofía de trabajo desarrollado como un sistema de entrega del proyecto que requiere de un equipo que ayuda a los clientes a decidir lo que quieren, además de apoyar las decisiones y la realización de las actividades.

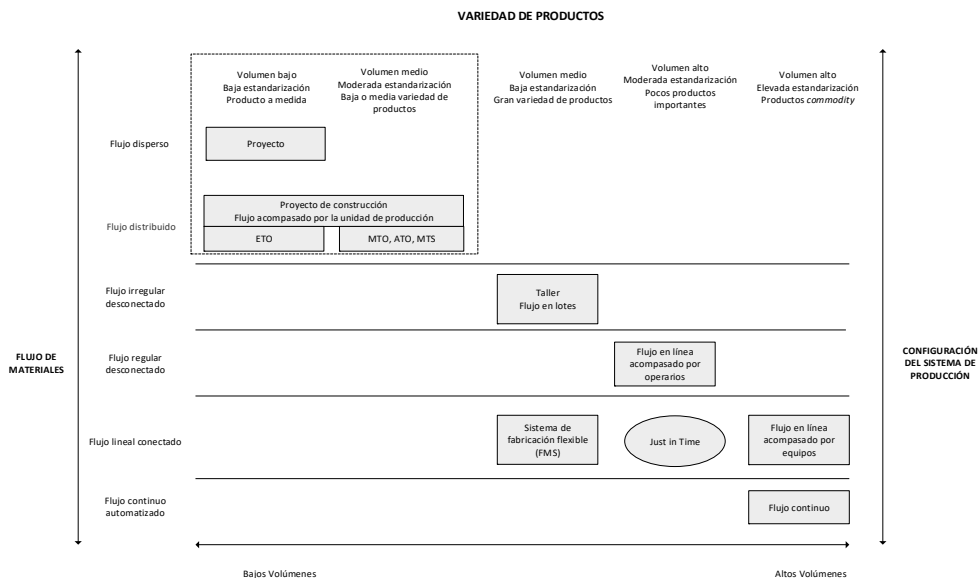


Figura 2.2. Matriz de Producto - Proceso.
 Fuente: elaboración propia basada en Miltenburg (1995).

EL DESARROLLO TRADICIONAL DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

Lo que se denomina la gestión tradicional del proyecto de construcción es la referencia a la manera en que se llevan a cabo los proyectos a lo largo de su vida, la cual se realiza conforme con prácticas aceptadas por los practicantes y que van siendo desarrolladas de manera *ad hoc* en las organizaciones para adaptarse a su realidad empresarial. Sin embargo, esta práctica ha llevado a fomentar el fraccionamiento en la información del proyecto, lo que afecta su calidad; esto se debe principalmente a que entre las fases del proyecto no se establecen acciones de cooperación entre los equipos de trabajo.

En la Figura 2.3, se presenta una configuración tradicional de las fases del proyecto de construcción de edificaciones. Se observan dos tipos de clientes: el cliente-inversionista, que permanece en el proyecto hasta la entrega al cliente comprador, en la misma figura, del punto A hasta el punto G (esta relación podría ir incluso hasta el punto H si el negocio se estructura hasta esta fase) y el cliente-comprador que se integra al proyecto al momento de pagar por el derecho a participar en él, su participación se aprecia del punto B al punto H y posteriormente se hace cargo de su activo físico.

Un proyecto inicia con el desarrollo de la fase de prefactibilidad o factibilidad, la cual incluye las condiciones técnicas, económicas, financieras,

ambientales, entre otras, para pasar a desarrollar el anteproyecto arquitectónico. En este anteproyecto se integran los requerimientos del cliente-comprador, los que se obtienen de manera indirecta, por medio de estudios de mercado, informes de actividades de postventa y encuestas de satisfacción a compradores en proyectos similares. En esta fase se integran tendencias tecnológicas y de diseño arquitectónico para ofrecer un mejor producto.

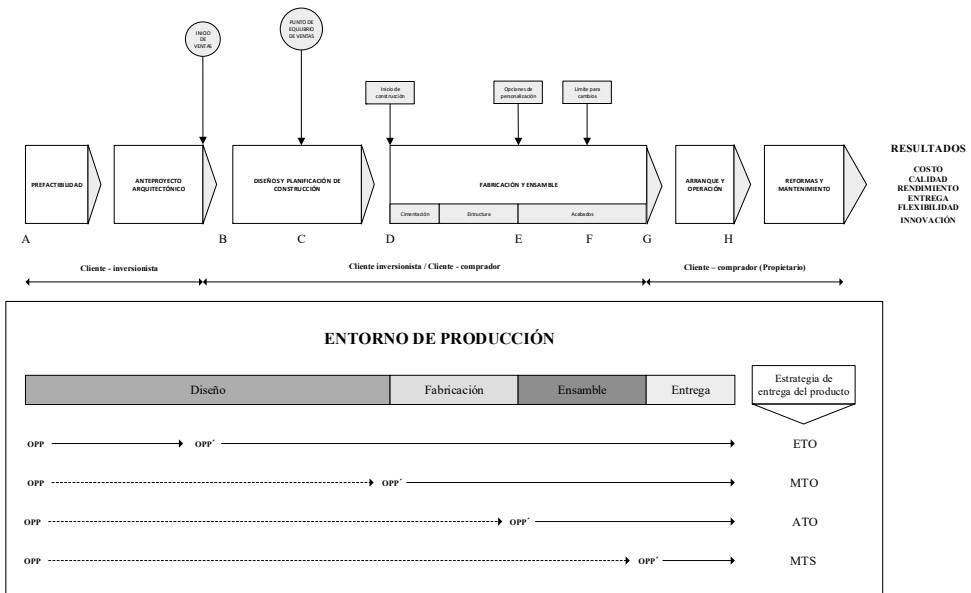


Figura 2.3. Configuración tradicional del proyecto de construcción.

Fuente: elaboración propia.

Con el anteproyecto, se da inicio al proceso de ventas de los derechos a participar del proyecto. Este proceso de ventas busca alcanzar el punto de equilibrio, el cual es un punto que garantiza la financiación de los costos de construcción del proyecto completo; de esta manera se inicia la construcción, punto D. En esta fase son poco comunes los análisis de valor referidos a las partes interesadas del proyecto diferentes al cliente-inversor y al cliente-comprador.

De acuerdo con la velocidad del proceso de ventas, el punto D se desplaza hacia la izquierda en esta fase, punto C. En este punto se debería disponer de un proyecto con alto nivel de detalle o de maduración para la construcción; sin embargo, es muy común que no cuente con un adecuado nivel de edificabilidad, lo cual es una fuente de desperdicios, principalmente reprocesos y esperas (Rubiano y Cano, 2013).

En la fase de construcción del proyecto, en casos particulares, se permite al cliente-comprador cierto nivel de personalización. Sin embargo, un inadecuado control de la atención de las solicitudes de personalización puede llegar a ocasionar que estas intervenciones afecten el costo final para el cliente-comprador y plazo de finalización de construcción de todo el proyecto y, por lo tanto, el de cierre del proyecto, puntos E y F.

Mejoramiento de la productividad del proyecto de construcción a partir del mejoramiento de la gestión de la producción

La entrega de un proyecto a tiempo, con la calidad y el costo previstos, el cumplimiento de especificaciones y el alcance prometido, tradicionalmente han sido los indicadores de éxito del proyecto. Sin embargo, en el proceso de producción del proyecto de construcción no es fácil identificar qué cosas pudieron realizarse con menos recursos, en menos tiempo, con mayor calidad y cuál fue realmente el valor agregado al cliente. Rubiano y Cano (2013) relacionan diversas situaciones en el desarrollo del proyecto que impactan negativamente su eficiencia; entre estas se tienen: los bajos niveles de *constructabilidad*, el flujo intermitente de recursos financieros, el exceso de burocracia, de controles, revisiones y autorizaciones, los reprocesos de diseños y trabajos en obra, la pobre cualificación de contratistas y consultores, los ineficientes procesos de gestión contractual, entre otros. De acuerdo con Changali, Mohammad y Nieuwland (2015), esto refuerza el hecho de que la gestión del proyecto requiere un cambio urgente.

El interés generalizado de mejorar la eficiencia del sector y aumentar la productividad es una decidida intención por la cual el sector de la construcción a nivel mundial ha mostrado un interés creciente en implementar estrategias de mejoramiento que contribuyan con este propósito. Un ejemplo de ello es la estrategia del Reino Unido denominada “Construcción 2025”, que ha establecido un plan ambicioso de mejora, que incluye, entre otros, los siguientes aspectos: reducir el tiempo de desarrollo del proyecto de construcción, desde su concepción hasta su entrega para operación, en 50% tanto para construcción nueva como para remodelaciones; y reducir en 33% el costo de construcción y el costo de mantenimiento. Para el cumplimiento de estos objetivos, tanto el Building Information Modeling (BIM) como Lean Construction son enfoques actuales en la construcción (Aziz y Hafez, 2013).

De acuerdo con Sacks *et ál* (2010), BIM y LC, siendo enfoques independientes, desarrollan una importante sinergia para su utilización en la industria de la construcción. Esto se logra a partir de las relaciones que se pueden establecer entre ellos en el desarrollo del proyecto. Las prácticas BIM pueden ser adoptadas de manera independiente de LC y viceversa;

sin embargo, juntos tienen un amplio potencial para mejorar el desempeño del proyecto de construcción. BIM permite obtener el modelo virtual con el más alto nivel de detalle posible, que ofrece no solo detalles constructivos, sino la información que se requiere para adelantar la construcción con la seguridad de reducir a su mínima expresión la aparición de reprocesos por causa de diseños incompletos. De esta manera, LC hace uso de un proyecto detallado para desplegarse como un sistema de producción haciendo uso de los principios, las herramientas y construyendo una cultura alrededor del mejoramiento continuo.

La difusión de LC ha sido un esfuerzo inicial de un pequeño número de académicos del International Group for Lean Construction (IGLC) dedicados a formular una fuerte base teórica para LC. Esta teoría viene desarrollándose en pasos graduales con enfoque en los estudios de mejora de procesos de producción, planificación, estudios especializados, operaciones en el sitio de trabajo y, especialmente, en estudios de mejora de la gestión de producción en construcción. Se han publicado experiencias exitosas en implementación de LC en diversos países alrededor del mundo; sin embargo, como resaltan Aziz y Hafez (2013), aunque la implementación de LC se encuentra en avance, ya cuenta con cierta madurez que es importante conocer para intensificar su uso en beneficio de la productividad del sector.

La mejora de la productividad tiene una fuerte relación con el mejoramiento de la eficiencia y la eficacia en el proceso de producción (Dahmus y Gutowski, 2005; Horta, Camanho, Johnes y Johnes, 2013), de tal manera que el desafío constante para el sector es la mejora de su productividad e innovación. Esto se traduce en entregar la oferta de valor con el mejor desempeño del sistema de producción.

INTEGRACIÓN DE LEAN EN LA PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

El término Lean es la denominación en Occidente de la producción japonesa de vehículos, como una consecuencia del estudio realizado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en el marco del Programa Internacional de Vehículos de Motor en la década de 1990 (Womack, Jones y Roos, 1990). Este estudio mostró que el sistema de producción de vehículos desarrollado por Toyota Motor Company ofrecía un alto nivel de eficiencia y calidad que ubicaban a Toyota por encima de sus competidores occidentales. Al mismo tiempo, esta forma de producción utilizaba menos recursos, tiempo y dinero (Womack y Jones, 2003). Este sistema de producción se

denominó Toyota Production System (TPS) y fue desarrollado por el ingeniero Taiichi Ohno en los años 50, después de la Segunda Guerra Mundial (Ohno, 1988), con la intención de lograr altos niveles de eficiencia, para responder a las restricciones del mercado japonés⁵.

El sector de construcción aporta de manera significativa al desarrollo económico de un país (Ive y Gruneberg, 2000; Rangelova, 2015), y sus productos proveen de infraestructura pública y privada a las actividades productivas, lo que sustenta su desarrollo económico integrando diferentes empresas relacionadas (Stasiak-Betlejewska y Potkány, 2015; Wibowo, 2009). Este sector consume un alto porcentaje de materiales locales y propicia el incremento del empleo, lo que lo hace muy influyente en la mejora de la eficiencia económica; sin embargo, es un sector con un bajo nivel de desarrollo y alta ineficiencia (Anaman y Osei-Amponsah, 2007).

Los productos de construcción se llevan a cabo en fases secuenciales que requieren de un largo periodo de elaboración para disponer de ellos, haciendo uso intensivo de mano de obra con bajo nivel de calificación, razón por la cual influye directamente sobre la economía del país. El producto de construcción requiere de una organización temporal para suplir todos los requerimientos para su elaboración (Koskela, 1992; Warszawski, 2005) y demanda la producción de bienes y servicios de otras industrias relacionadas (Stasiak-Betlejewska y Potkány, 2015), haciendo de este un sector complejo con muchos sectores interrelacionados, tales como manufactura, energía y finanzas, entre otros (Bon, 1992).

En términos del desarrollo de un país, para poner en marcha cualquier proyecto de expansión de la economía se requiere inversión en infraestructura como condición previa para el crecimiento económico potencial (Hillebrandt, 2000; Ive y Gruneberg, 2000). En general, se aumenta el gasto público para proveer empleo, lo que tiene efecto en la empleabilidad de mano de obra no calificada (Ball y Wood, 1995). Se entiende, entonces, que cualquier cambio en esta industria produce un alto impacto en la producción económica del país, pues es una parte importante e integral de la producción nacional, lo que representa una proporción considerable en el producto interno bruto (PIB) de los países (Crosthwaite, 2000; Ganesan, 2000; Šatanová y Krajčírová, 2012), con una participación del 7% al 10% del PIB en países desarrollados, y entre el 3% y el 6% del PIB en países en desarrollo (Lowe, 2003).

⁵ Un mercado pequeño con alta demanda de variedad de productos, al contrario de los mercados en Estados Unidos con altas demandas.

En razón del alto impacto de la construcción en la economía de un país, los cambios que se implementen en esta industria tienen un efecto directo en su producción nacional, debido a que, al aumentar la productividad laboral, se impacta directamente la capacidad competitiva de una economía, se reducen los costos de producción y se realiza una mejor oferta de precios (Coremberg, 2013; Crosthwaite, 2000; Ganesan, 2000; Myšková, 2009; Šatanová y Krajčirová, 2012). De esta manera, una mejoría en el sector de la construcción implica un aumento de su aporte al PIB, lo que genera un efecto multiplicador en la actividad económica, principalmente sobre la generación de empleo.

De otra parte, la ineficiencia del sector se asocia a la manera como las empresas de construcción han venido reproduciendo sistemáticamente la forma en que gestionan y llevan a cabo la producción de sus proyectos; por lo general, procesos desarrollados *ad hoc* (Teicholz, 2014). Como resultado, se obtienen proyectos ineficientes a pesar del uso de nuevas tecnologías (Aziz y Hafez, 2013; Fearne y Fowler, 2006; Guo, 2008; Koushki, Al-Rashid y Kartam, 2005; Teicholz, 2014). En el entorno internacional, según el estudio de Teicholz (2014) realizado en seis países de Europa y en Estados Unidos, la mejora de la productividad laboral en la industria manufacturera es del orden de 1,7 veces mayor que en la construcción, con un crecimiento en las dos últimas décadas por encima del 3 % anual, mientras que, en ese mismo periodo, el de la construcción ha sido del -0,32 % anual. Según el autor, en tanto la industria de la construcción no realice cambios significativos en sus actuales prácticas de gestión y producción, habrá poca oportunidad de alcanzar un mayor nivel de eficiencia y será mucho más difícil alcanzar y sostener un nivel de eficiencia comparable con la manufactura. Asimismo, sugiere que las causas de este comportamiento están asociadas con una inadecuada formación para el trabajo del personal de obra, precarios procesos de seguridad en construcción, una mayor complejidad de los proyectos y exigencia en el cumplimiento de plazos de construcción cada vez más cortos.

De acuerdo con Changali, Mohammad y Nieuwland (2015), una mejor gestión de proyectos y la innovación tecnológica pueden mejorar las posibilidades de éxito del proyecto de construcción. Algunos de los factores responsables de la baja productividad son la pobre organización, comunicación inadecuada, pobre gestión del proyecto, desacuerdos contractuales, inadecuada conexión entre los diferentes niveles de planificación, pobre planificación a corto plazo, insuficiente gestión de riesgos y limitada gestión del talento humano. De otra parte, Yi y Chan (2014), en su investigación sobre la productividad laboral en construcción, relacionan algunos factores,

al nivel del proyecto, que la impactan positiva y negativamente. Estos factores se agrupan en cinco componentes:

- **Gestión:** planificación, coordinación y control adecuados, programación realista.
- **Aspectos laborales:** convenios colectivos, prácticas de trabajo restrictivas, ausentismo, alta rotación del personal, retrasos, disponibilidad, nivel de experticia y uso de equipos.
- **Gubernamentales:** entorno político, reglamentos, normas sociales y ambientales.
- **Tipos de contratos:** aspectos asociados a la relación con el contratante.
- **Financiación:** estrategias adecuadas según el tipo de proyecto (Koe-hn y Brown, 1986).

El Sistema de Producción Toyota (TPS)

El TPS se fundamenta en el desarrollo de una filosofía a largo plazo que propicia el desarrollo de las personas en la organización, sus socios y proveedores, el aprendizaje y la mejora continua. Desde esa perspectiva, se articula el mejoramiento del flujo de producción (Liker, 2011), a partir de principios agrupados en cuatro categorías, las cuales, para esta investigación, se clasificaron coincidiendo con las presentadas por Shang (2013) (la filosofía a largo plazo, el proceso correcto producirá los resultados correctos, añade valor a la organización mediante el desarrollo de su personal y la resolución continua de los problemas fundamentales impulsa el aprendizaje organizacional), las cuales se muestran en las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. Estas categorías fueron clasificadas de manera equivalente por Shang (2013) como: el modelo de filosofía, el modelo de proceso, las personas y modelo de socios y el modelo de resolución de problemas.

El TPS tiene la habilidad de ser adaptado y aplicado a cualquier empresa y a cualquier proceso de producción, ya sea en la industria o en servicios. Más adelante, se presentan los principios de Lean y Lean Construction que, junto con los principios del TPS, se usan para fundamentar el desarrollo del modelo de evolución en el sentido de que gran parte de los atributos de madurez responden directamente al cumplimiento de estos principios.

Filosofía a largo plazo

Una empresa que comprende la posición que ocupa en el mercado y la sociedad, y busca alcanzar el más alto nivel en su sector (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Principio 1 del TPS

Personas	Principio	Descripción
1	Las decisiones de gestión de la empresa deben estar basadas en una filosofía a largo plazo.	Para cumplir sus metas en el corto plazo, la empresa debe fijarse objetivos de largo plazo y trabajar, crecer y alinear las decisiones en torno a ellos.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

EL PROCESO CORRECTO PRODUCIRÁ LOS RESULTADOS CORRECTOS

Estos principios están relacionados directamente con la eficiencia de la producción, con el mejoramiento del sistema de producción (Tabla 2.2).

Añada valor a la organización mediante el desarrollo de su personal

Estos principios están relacionados con las personas, con su crecimiento personal y profesional, lo que genera beneficio para la organización (Tabla 2.3).

La resolución continua de los problemas fundamentales impulsa el aprendizaje organizacional

Estos principios están relacionados con el mejoramiento de la producción (Tabla 2.4).

Tabla 2.2. Principios 2 al 8 del TPS

No.	Principio	Descripción
2	Establecer procesos en flujo constante para detectar problemas.	Lograr un flujo continuo en el proceso de producción con el que se busque reducir o eliminar el tiempo en el que un producto está parado y esperando continuar a la siguiente estación en su elaboración. Se busca crear un mayor flujo de productos e información, reducir el inventario, las esperas y evidenciar los problemas que interfieren el flujo de trabajo.
3	Evitar producir en exceso mediante sistema <i>pull</i> .	Implementar un sistema <i>pull</i> para reponer el material cuando se requiera, de esta manera se minimiza el material en inventario, manteniendo solo la cantidad estrictamente necesaria. Así, el sistema de producción es más flexible y se desarrolla según las demandas del cliente, ya sea interno o externo.
4	Nivelar la carga de trabajo.	Con este principio se busca reducir el trabajo en lotes. Esta forma de producción implica largos periodos de sobrecarga de producción seguidos de periodos de excesiva tranquilidad.

No.	Principio	Descripción
5	Parar para solucionar los problemas en el momento en que se detectan.	Desarrollar en las personas la confianza y el empoderamiento de parar un proceso cuando se detecte un error para solucionarlo inmediatamente y evitar elaborar productos defectuosos que lleguen al final del ciclo de producción.
6	Estandarizar como fundamento de mejora.	El establecimiento, la gestión y el mantenimiento de estándares permiten que se mantenga una forma de hacer el trabajo que contribuye a la eficiencia del sistema.
7	Usar el control visual para detectar problemas.	Los indicadores visuales ayudan a detectar rápida y fácilmente desviaciones o errores que afectan la calidad del producto.
8	Utilizar solo tecnología fiable y probada.	Hacer uso de tecnología que sea evaluada y estudiada antes de aplicarla para evitar que interfiera negativamente con los procesos de producción.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

Tabla 2.3. Principios 9 al 11 del TPS

No.	Principio	Descripción
9	Promover el liderazgo.	Desarrollar personas y equipos excepcionales que sigan la filosofía de su empresa. Desarrollar líderes que comprendan perfectamente el trabajo, vivan la filosofía y la enseñen a otros.
10	Formar a los empleados para que sigan la filosofía.	Buscar la creación y promoción de una cultura que se extienda a todo el personal de la organización y que promueva el cumplimiento de los principios.
11	Ayudar a mejorar a sus socios y proveedores.	Respetar su red extendida de socios y proveedores, desafiándoles y ayudándoles a mejorar. Conseguir que los socios y proveedores utilicen los principios para impulsar la mejora continua y la calidad.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

Tabla 2.4. Principios 12 al 14 del TPS

No.	Principio	Descripción
12	Para comprender la situación hay que verlo por sí mismo (Genchi Genbutsu).	Cuando se produzca un problema es necesario ir al foco, a la fuente y observar por qué se ha producido, verificando los datos in situ, en lugar de centrarse en información aportada por otras personas que pueden no reflejar la totalidad del escenario a estudiar.

No.	Principio	Descripción
13	Tomar decisiones considerando todas las opciones y actuar de forma rápida.	Tomar las decisiones por consenso lentamente, considerando concienzudamente todas las opciones e implementarlas rápidamente. Convertir la organización en una que aprende mediante la reflexión constante (Hansei) y la mejora continua (Kaizen).
14	Convertirse en una empresa que aprende.	Aprender de forma constante, de esta manera se convierte en un hábito.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

Lean Manufacturing

En 1996, Womack, Jones y Roos mostraron en su libro *La máquina que cambió al mundo* cómo Toyota, una empresa que para la época era la mitad del tamaño de General Motors, pasó a ser el fabricante de automóviles más eficiente del mundo. Toyota mantiene su éxito en la actualidad basado en una adecuada combinación de sistemas de dirección, pensamiento y filosofía a largo plazo (Liker, 2011). Lean Production (LP), también denominado Lean Manufacturing por su uso específico en la industria de manufactura, es una mirada diferente de la producción con procesos tradicionales, que busca satisfacer la demanda del cliente haciendo que el proceso de producción sea cada vez más eficiente al propiciar el mejoramiento continuo a través de la eliminación sistemática de desperdicios en todos los procesos de producción.

Lean integra los principios, la cultura y las herramientas de gestión y tecnológicas para entregar al cliente final el valor ofrecido con alta calidad, bajo costo y en el tiempo prometido. Esto se logra produciendo lo que el cliente final requiere, cuando lo quiere, donde lo quiere y a un precio justo. En este sentido, de acuerdo con Womack y Jones (2003), son cinco principios fundamentales para desarrollar el pensamiento Lean. Siguiendo paso a paso estos principios, se obtiene el máximo beneficio de su aplicación (Aziz y Hafez, 2013), un alto nivel de servicio y, al mismo tiempo, se es capaz de adaptarse a un entorno cambiante. Los principios Lean Manufacturing se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Principios Lean Manufacturing

N.º	Principio	Descripción
1	Especificar el valor del punto de vista del cliente.	Especificar el valor a partir del entendimiento de las necesidades del cliente y su propia concepción de valor. Se identifican, en el proceso de producción, las actividades que agregan valor en la obtención del producto o servicio y sirven a los requerimientos del cliente. Se reconoce que solo una pequeña fracción del tiempo y esfuerzo en cualquier organización agrega valor para el cliente final. Al definir claramente el valor desde la perspectiva del cliente final, las actividades sin valor –o desperdiciadoras– son objeto de eliminación.
2	Identificar y mapear la cadena de valor.	Después de entender los deseos y necesidades del cliente, se identifica cómo se va a entregar (o cómo no se va a entregar) el producto o servicio. La cadena de valor se compone de las actividades que deben ser ejecutadas en todas las áreas de la organización para entregar el producto o servicio prometido. Sin embargo, muchas de las tareas involucradas en esta cadena no agregan valor por el cual el cliente estaría dispuesto a pagar. Al crear el mapa del flujo de valor, se identifican todas las actividades en la cadena de valor: las que agregan y las que no agregan valor. Con el conocimiento del mapa de valor, se identifican las actividades a eliminar y aquellas que se deben reducir a fin de mejorar el flujo.
3	Optimizar el flujo, a través de los pasos que agregan valor, eliminando el desperdicio.	Hacer que los pasos de creación de valor se produzcan en secuencia, de tal forma que el producto fluya sin interrupciones ni sobresaltos hacia el cliente. Se debe asegurar que haya un flujo continuo en los procesos y la cadena de valor. Enfocarse en el proceso y no en el producto final. Sin embargo, el flujo nunca será óptimo hasta que se especifique el valor de acuerdo con el cliente y se identifique la cadena de valor.
4	Permitir que el cliente utilice el sistema cuando lo necesite. Cambiar <i>push</i> por <i>pull</i> .	Se trata de comprender la demanda de los clientes en su producto o servicio y luego crear un proceso que responda efectivamente a esta, de tal manera que se produzca solo lo que el cliente requiere. O sea, producir solo lo que se necesita de acuerdo a la demanda real, más que a la pronosticada, tirar del proceso de producción (<i>pull</i>) en lugar de empujar (<i>push</i>). De esta manera se produce exactamente lo que el cliente quiere en el momento que lo necesita. La idea es reducir la producción innecesaria y utilizar la herramienta de gestión “Just In Time”.
5	Mejorar siempre, buscando la perfección.	Buscar que el número de pasos y la cantidad de tiempo e información necesarios para llegar al cliente vaya disminuyendo continuamente. Tiene como objetivo la solución perfecta y mejoras continuas. Entregar un producto a los clientes que está a la altura de las necesidades y expectativas, dentro de la programación de tiempo acordado y en perfecto estado, sin errores ni defectos.

N.º	Principio	Descripción
5	Mejorar siempre, buscando la perfección.	La única manera de hacerlo es tener una comunicación estrecha con el cliente, así como los administradores y los empleados son el medio. Crear el flujo y establecer <i>pull</i> comienza con reorganizar radicalmente diferentes pasos del proceso, pero los beneficios son verdaderamente significativos, ya que todos los pasos se enlazan. Mientras esto sucede, los desperdicios se hacen visibles y el proceso continúa hacia el punto final teórico de la perfección, donde cada activo y cada acción agregan valor para el cliente final.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

Lean en la construcción

Lean Construction se propone como una reconceptualización de la producción en el sector de la construcción. Toma como fundamento la producción en manufactura desarrollada con el enfoque Lean Production, el cual está basado en el Sistema de Producción Toyota (Toyota Production System [TPS, por su sigla en inglés]). Lean se enfoca en la creación de valor y en la eliminación del desperdicio. El modelo de producción tradicional ha sido desarrollado como un proceso que convierte insumos en productos o servicios. Este modelo solo considera las actividades de conversión como actividades que agregan valor y no tiene en cuenta las actividades de flujo (aquellas que no agregan valor, pero que son necesarias para llevar a cabo la transformación). La producción Lean se enfoca en entender el valor desde el punto de vista del cliente y de esta manera hacer que el sistema de producción se alinee con estos requisitos de valor y busque la satisfacción de las necesidades precisas de los clientes. En el proceso se van reduciendo y eliminando sistemáticamente, según sea el caso, las actividades que no agregan valor, pues se busca aumentar la eficiencia de las actividades que agregan valor (Shingo, 1992).

La construcción Lean es la manera de implementar el TPS en el sector de construcción, ya que es muy importante darle una connotación como un tipo de producción (Bertelsen, 2004). A partir de la investigación realizada, se propone a la comunidad LC un nuevo principio: el cumplimiento de la oferta de valor. Pero LC no es solo un sistema de producción más eficiente a partir del cumplimiento de los principios propuestos por Koskela (1992); tiene la capacidad de integrar sistemáticamente aspectos que contribuyen a que las personas y la organización crezcan en el desarrollo del sistema en todos los aspectos relacionados con la producción.

La industria de la construcción está valorando altamente la integración de LC como un enfoque con muchas ventajas para el medio ambiente cons-

truido (Nesensohn y Bryde, 2012). Se trata de una novedosa manera de entrega de proyectos, más adecuada para proyectos con altos niveles de complejidad como los de construcción (Ballard y Howell, 1994; Howell, 1999). En este sentido, Koskela (1992) establece como uno de los principios LC: “Aumentar del valor de salida a través de la consideración sistemática de las necesidades del cliente” (p. 18).

De otra parte, la investigación sustenta que Lean debe enfocarse en el cumplimiento de la oferta de valor pues la creación de valor se produce en la cadena de valor del proceso mismo. Este aún no es un concepto visible en la literatura, dado que un sistema que responde al cumplimiento de la oferta de valor debería ajustarse sistemáticamente a una oferta de valor más exigente. De esta manera, se desarrolla conceptualmente el SLC-EModel, para identificar el actual nivel de madurez del sistema de producción y proponer la mejora del proceso de producción en función de la mejora del cumplimiento de la oferta de valor.

El mejor desempeño de las empresas manufactureras y de servicios que han usado Lean propició que se considerara estudiar su aplicabilidad en construcción. Koskela (1992) fue quien presentó los primeros argumentos para su utilización en construcción. Él estudió el desarrollo de Lean en manufactura y propuso su aplicación a la construcción mediante un proceso de producción en construcción desarrollado a partir de la teoría TFV de la producción, o teoría de transformación, flujo y valor, en la que los tres elementos deben ser gestionados simultáneamente.

Más adelante, Bertelsen (2017) propone usar el concepto *operación* en lugar de *transformación*, y cambiar el orden de los elementos de la teoría: *valor, operación y flujo*. En esencia, no sugiere un cambio en la teoría del TFV, sino que es una manera de acercar la construcción a un proceso más industrial de la producción bajo principios de Lean Production aplicados a la construcción. Koskela (citado en Bertelsen, 2017) elige el uso de la palabra *transformación* por razones históricas. Bertelsen (2017), sin embargo, resalta que Shingo (1992) utiliza el concepto *operación*, ya que considera las operaciones tanto productivas como contributivas como elementos del proceso mismo; su uso ofrece una perspectiva más amplia en términos de la producción. Y dado que la creación de valor es lo más importante en el proyecto, renombra la teoría del TFV de Koskela (1992) como la teoría de valor-flujo-operaciones, o teoría VFO.

La creación de valor es un proceso en el cual se consultan las expectativas del cliente para que, a través del diseño del proceso de producción, se entregue al cliente aquello por lo que está dispuesto a pagar. Se busca que este ejercicio genere beneficios para el crecimiento continuo y sostenido

de la organización. El flujo mueve el producto de un estado de elaboración al siguiente para ser transformado según las operaciones. En las operaciones se identifican productivas, contributivas y otras desperdiciadoras, de tal manera que para cada una de ellas se persiguen objetivos diferentes: mejorar continuamente la eficiencia de las operaciones productivas, reducir y mejorar las operaciones que no agregan valor y que son necesarias para la producción de aquellas que sí agregan valor y eliminar las operaciones desperdiciadoras.

Lean se centra en la eliminación continua y sostenida de desperdicios, los cuales no agregan valor y obstaculizan el flujo de producción. Un desperdicio es todo aquello, adicional a lo mínimo necesario para fabricar un producto o prestar un servicio. Estos mínimos necesarios corresponden a materiales, equipos, personal, tecnología, etc. Los desperdicios compiten por recursos que pueden ser mejor aprovechados principalmente en el mejoramiento de las operaciones que agregan valor; asimismo, corresponden a operaciones de flujo que no agregan valor al cliente. Se identifican diez tipos de desperdicios:

1. Esperas, tiempos de inactividad por inadecuada sincronización del trabajo, no disponibilidad de materiales o falta de espacio para trabajo.
2. Productos defectuosos, o materiales o servicios que no cumplen con las expectativas o con las especificaciones.
3. Sobreproducción, la fabricación de artículos en mayor cantidad que las requeridas por el cliente. Producir más de lo demandado antes de que sea necesario.
4. Inventarios en exceso o innecesarios que conducen a pérdidas de material y monetarias por la no utilización del capital. Se manifiesta en el excesivo almacenamiento de materia prima o materiales, producto en proceso y producto terminado.
5. Sobreprocesamiento, pasos innecesarios en las operaciones de producción que no añaden valor.
6. Movimientos innecesarios, desplazamientos físicos de productos o materiales que realice el personal, que no agregan valor.
7. Transportes innecesarios, de productos, materiales, personas, equipos de un lugar a otro hasta realizar la producción.
8. Talento de las personas no utilizado, se refiere a no aprovechar la creatividad e inteligencia de las personas para el proceso de producción, sus competencias, potencial de entender los problemas, eliminar desperdicios y propiciar la mejora continua.

9. Making Do. Esta categoría de desperdicio fue identificada por Koskela (2004). Se considera una de las principales fuentes de desperdicio en construcción. Se presenta cuando se comienza una tarea sin tener disponibles todos los insumos y requerimientos necesarios para ser completada, o la ejecución de la tarea continua, aunque la disponibilidad de al menos un insumo o requerimiento haya cesado.
10. Improvisación. Aparece cuando las personas usan cualquier solución que tengan a mano para alcanzar las metas llegando hasta redefinir objetivos y alcances de acuerdo con los recursos disponibles (Vera y Crossan, 2004). Es importante entender que *Making Do e improvisación* no se refieren a una misma categoría de desperdicio, aunque tienen elementos que pueden ser considerados comunes.

Como mencionan Formoso, Sommer, Koskela e Isatto (2011), *Making Do* tiene una fuerte correlación con el concepto de *improvisación*, aunque no son lo mismo. En la literatura se discute el concepto de *improvisación* como una práctica humana altamente estructurada y se resalta como una fuente importante de mejoras e innovación (Ciborra y Hanseth, 1998; Moorman y Miner, 1998; Verjans, 2005). Sin embargo, estos autores no consideran que la improvisación sea una fuente de desperdicio. La improvisación se conoce también como *bricolage* (Hamzeh, Morshed, Jalwan y Saab, 2012), y en su desarrollo no se tiene tiempo para hacer un adecuado uso de los recursos, de ahí la evidencia para considerarla un desperdicio.

Definición de Lean Construction

De acuerdo con Koskela, Howell, Ballard y Tommelein (2002), “LC es una manera de diseñar sistemas de producción para minimizar el desperdicio de materiales, tiempo y esfuerzo con el fin de generar la máxima cantidad posible de valor” (p. 211). Entonces, considerando que no se identifica en la literatura una definición más precisa de LC, a pesar de que se cuenta con el trabajo de Mossman (2018), quien ha realizado una compilación de definiciones y un estudio a nivel de encuesta con expertos buscando esta definición. Para este autor, “Lean es una colección práctica de teorías, principios, axiomas, técnicas y formas de pensar que juntas y severamente pueden ayudar a individuos y equipos a mejorar los procesos y sistemas dentro de los cuales trabajan” (p. 11).

Basada en diferentes autores como Nesensohn *et ál.*, (2014), Koskela y Howell (2008), Ballard y Tommelein (2012), Bernstein y Jones (2013) y Mossman (2018), la investigadora ha desarrollado la siguiente definición que considera a LC un sistema de producción:

Definición para Lean Construction

Lean Construction es un sistema de gestión de la producción de proyectos de construcción cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la oferta de valor por medio de: (a) la aplicación de los principios de la producción Lean en la industria de la construcción, (b) el desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas, con enfoque en el cliente, y de autoevaluación permanente y (c) la utilización e innovación de la tecnología para la gestión y el mejoramiento continuo de la producción (Figura 2.4).

Esta definición adquirió importancia para el desarrollo de la investigación, pues en ella se entiende la construcción como un proceso sistémico de producción. La investigación realizada propone que esta definición pueda ser estudiada por el cuerpo académico de LC para ser integrada a la discusión de una definición para LC.

Guarda importancia disponer de una base conceptual para reducir imprecisiones sobre lo que es y no es LC. Es así que esta definición se enfoca en LC como un sistema de producción basado en principios que busca integrar las herramientas y construir esa cultura que garantice la sostenibilidad de la implementación en el tiempo. Esta cultura desarrolla la autoevaluación como elemento que propicia la mejora continua al contar con las herramientas y la disposición para autorregularse y evolucionar.

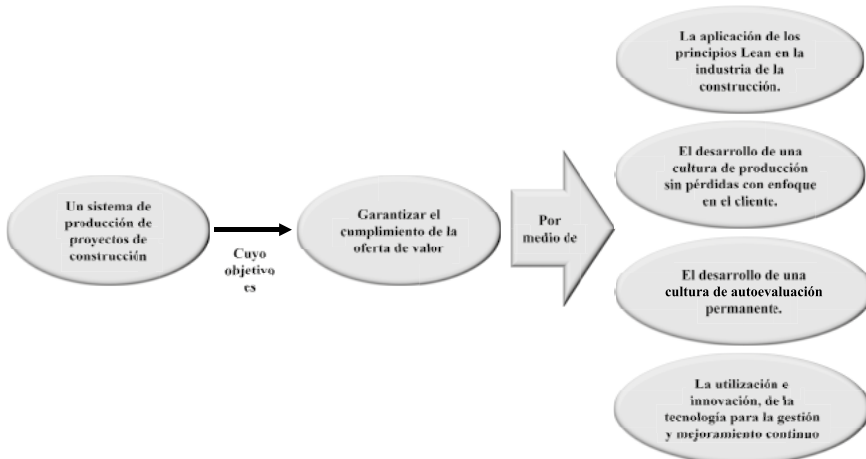


Figura 2.4. Definición de LC como un sistema de gestión de la producción de proyectos de construcción.

Fuente: elaboración propia.

Triángulo del sistema de producción LC

La Figura 2.5 muestra la relación entre aspectos fundamentales de LC en la producción del proyecto de construcción: (a) los principios LC que mueven

el sistema; (b) la cultura que permite que las personas aprendan, se capaciten y se entrenen constantemente para soportar el sistema; que sean valoradas, respetadas y cuidadas en el desarrollo de su trabajo para contar con personas motivadas y empoderadas y (c) la tecnología, que implica su uso apropiado para apoyar el trabajo.

Tomando como base el triángulo de LC propuesto por el Centro de Excelencia de Gestión de Producción de la Universidad Católica de Chile (Gepuc), la investigación realizada considera que la relación entre los tres aspectos se debe centrar en el cumplimiento de la oferta de valor, el cliente como elemento central. LC, como sistema de producción, es a la construcción lo que el TPS es al sistema de producción para Toyota.

De acuerdo con Lean, este sistema de producción debe propiciar el desarrollo de una cultura que piense constantemente en la eliminación de pérdidas, una cultura que aprenda y cree estrategias basadas en la solución de problemas y el mejoramiento continuo. Es una cultura fundamentada en principios del TPS, los cuales propician el desarrollo de las personas y el crecimiento organizacional con enfoque en el cliente. Finalmente, el uso de la tecnología contribuye, junto con los otros dos conceptos, a mejorar la eficiencia del proceso de producción del proyecto y la productividad de la organización.

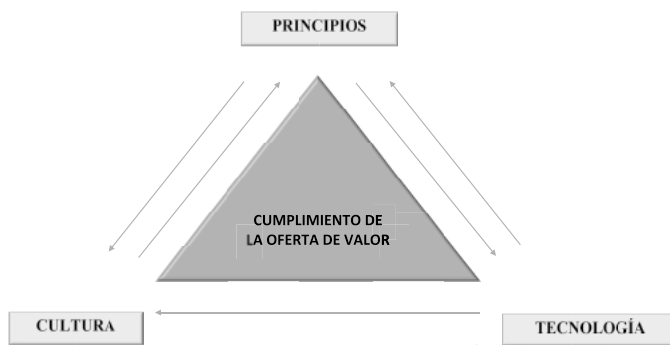


Figura 2.5. Triángulo del sistema de producción LC. Esquema de interacción de los elementos del sistema de producción Lean Construction.

Fuente: elaboración propia basada en el Triángulo Lean Construction según el Centro de Excelencia en Gestión de Producción, GEPUC, de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

El sistema de gestión de la producción LC integra, de manera complementaria, principios del TPS que le son pertinentes. A continuación, se explican con más detalle los tres aspectos que conforman el triángulo del sistema de producción LC: principios, cultura y tecnología.

Principios. Los principios que movilizan la producción

Son once los principios propuestos por Koskela (1992), a partir de los cuales ha venido creciendo el interés de los practicantes e investigadores en LC (Aziz y Hafez, 2013), dado que se enfocan en una producción más eficiente en la construcción. Posteriormente, Sacks, Koskela, Dave y Owen (2010) estudiaron la relación entre LC y el Building Information Modeling (BIM) para concluir que, a pesar de ser iniciativas muy diferentes, ambas impactan fuertemente la industria de la construcción. Sin embargo, reviste importancia considerar, en el desarrollo del sistema de gestión de producción LC, los principios relacionados con las personas, la organización y selección y uso de la tecnología resultado de los beneficios BIM.

Del trabajo de Sacks, Koskela, Dave y Owen (2010), se ampliaron de once principios de LC a dieciséis principios LC-BIM, que buscan la mejora de la eficiencia del proyecto de construcción, como el propósito fundamental de LC. En este trabajo, los autores, construyen una matriz que integra las funcionalidades BIM con los dieciséis principios de LC-BIM, los cuales fueron desplegados en veinticuatro elementos que los hacen operativos y detallan guías para su aplicación (Sacks *et ál.*, 2010).

Para esta investigación, la matriz guarda un particular interés debido a que la mayoría de sus elementos están considerados en el desarrollo del SLC-EModel, ya sea como factor de madurez, atributo o características que componen los atributos. Estos elementos también han sido identificados en la revisión de las referencias bibliográficas y en las entrevistas con expertos como elementos relacionados con la madurez de LC en la GPC. Desde el punto de vista de estos autores, estos principios movilizan la producción, y con relación a la investigación, ellos forman parte del modelo propuesto. La investigación identificó elementos de madurez contenidos en los principios desplegados por Sacks *et ál.* (2010), los cuales están asociados a los atributos que forman parte del modelo de madurez, y se integran a los atributos y características del SLC-MM.

A partir de la selección de los elementos para la investigación realizada, se evidenció un agrupamiento particular de elementos en conceptos que podrían constituirse como otros principios de LC. Se sugieren cuatro principios LC para integrarlos en el contexto conceptual de LC; y son:

- Desarrollo, uso y mantenimiento de estándares.
- Conocimiento, selección y uso apropiado de herramientas LC.
- Desarrollo de un sistema *pull*.
- Cumplimiento de la oferta de valor.

Un sistema de gestión de la producción LC considera, además de los procesos de transformación, los procesos relacionados con el flujo de materiales y de información (Koskela, 1992), así como los procesos de la organización que soportan la producción. Los indicadores clave de un proceso de producción de proyectos de construcción se relacionan con el tiempo de entrega del producto, el costo y los atributos de valor logrados en él, según los requisitos y las expectativas del cliente.

En general, todas las operaciones tienen costos y consumen tiempo, pero solo las operaciones de transformación son las que agregan valor. Lean, en general, busca que las operaciones de conversión sean más eficientes y se reduzcan o eliminen las operaciones que no agregan valor. Por lo tanto, para mejorar la eficiencia global de un proceso de producción en la ejecución del proyecto, el esfuerzo se concentra en la reducción o eliminación de las operaciones de flujo y en que las operaciones de transformación sean más eficientes.

El proceso de producción de un proyecto de construcción es complejo debido a la interacción entre diferentes áreas del sistema de producción, de la organización y las personas mismas, todas con objetivos locales contrarios a pesar de perseguir el mismo objetivo general, el proyecto. De ahí que el establecimiento de principios que direccionen el desarrollo del sistema de producción en construcción hacia un mejor desempeño, establece los parámetros de entendimiento de lo que implica la implementación de LC (Despradel *et ál.*, 2011).

Los principios LC están propuestos de acuerdo con el modelo de TFV de Koskela (1992), y Martínez, González y Fonseca (2009), quienes plantearon una manera de agruparlos en tres categorías: (a) mejoramiento de procesos, (b) reducción o eliminación de desperdicios y (c) enfoque en el cliente; además, consideran estas categorías como los pilares asociados a la implementación de LC.

A partir de la investigación realizada, la autora propone una nueva forma de agrupar los once principios de LC planteados por Koskela (1992), en dos factores y no cuatro como los presentan Martínez, González y Fonseca (2009), de tal manera que se muestre la relación directa de dichos principios con la producción. Estos grupos son factores en el modelo y son: mejoramiento del sistema de producción y mejoramiento de la producción (Tablas 2.6 y 2.7). Esta forma de agrupación permite alinear los procesos y servicios de la organización para ofrecer a los clientes aquellos aspectos del producto por los cuales están dispuestos a pagar y asegurar que todos los aspectos de la empresa se desarrollan en función del cumplimiento de la oferta de

valor. A continuación, se presentan los dos factores que agrupan los once principios LC.

Mejoramiento del sistema de producción

El sistema de producción se diseña de acuerdo con los requisitos de valor que deben ser integrados al producto y que responden a las expectativas del cliente final. Son siete principios LC que contribuyen a disponer de un mejor sistema de producción (Tabla 2.6).

Tabla 2.6. Principios LC asociados con el mejoramiento del sistema de producción

Principio	Descripción
Aumentar la flexibilidad de salida	Se trata de reducir los tamaños de lote para asemejarse a la demanda, reducir la dificultad y el tiempo para realizar diferentes configuraciones y cambios en la producción, lograr que la personalización sea lo más tarde posible en el proceso y formación de una fuerza de trabajo polivalente.
Reducir el tiempo de ciclo	El tiempo de ciclo es el tiempo requerido para que una pieza particular de material atraviese el flujo. El tiempo de ciclo considera tiempo de procesamiento, tiempo de inspección, tiempo de espera y tiempo de movimientos. Entonces, se busca comprimir el tiempo de ciclo, lo que obliga a la reducción de inspecciones, movimientos y tiempos de espera.
Reducir la variabilidad	Los procesos de producción son variables, sin embargo, se busca disponer de productos uniformes. Adicionalmente, la variabilidad en la duración de ejecución de una actividad aumenta el volumen de actividades que no agregan valor. Así que la reducción de la variabilidad dentro de los procesos debe ser un objetivo.
Enfoque en el control del proceso completo	Se busca eliminar el flujo segmentado, lo que ocasiona suboptimización de recursos. El control en el proceso completo contribuye a una mejor eficiencia de los recursos utilizados en la producción y se dispone de una autoridad de control para el proceso completo.
Simplificar, minimizar el número de pasos, partes y eslabonamientos	La simplificación corresponde a la reducción del número de componentes en un producto y la reducción del número de pasos en un flujo de material o información. Se puede realizar eliminando actividades que no agregan valor y reconfigurando el proceso en la etapa que agrega valor.
Aumentar la transparencia del proceso	El proceso de producción se hace transparente para facilitar el control y la mejora haciendo que el proceso sea directamente observable a través tanto de medios organizativos o físicos, mediciones como de la exhibición pública de la información.
Benchmarking	Se conocen procesos de clase mundial para reconfigurar los procesos de producción de la organización, incluidos los procesos de apoyo a la producción.

Fuente: elaboración propia basada en Koskela (1992).

Mejoramiento de la producción

Este grupo de principios se enfoca en la mejora continua de la producción misma. Lograr cada vez un mejor desempeño del sistema, al considerar los elementos clave que influyen en la entrega del producto (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Principios LC asociados con el mejoramiento de la producción

Principio	Descripción
Aumentar el valor de salida a través de la consideración sistemática de las necesidades del cliente	Crear valor mediante el cumplimiento de los requisitos del cliente y no solo debido a la transformación. Para cada actividad hay dos tipos de clientes, las actividades próximas y el cliente final. El enfoque práctico para este principio es llevar a cabo un diseño de flujo sistemático, en el cual los clientes se definen para cada etapa, y se analizan sus requisitos
Aumentar la eficiencia de las actividades que agregan valor	En la mejora de las actividades productivas, las transformaciones y los flujos deben ser direccionados. Para cualquier proceso de producción, los aspectos de flujo y de transformación tienen cada uno un potencial diferente de mejora. El potencial de mejora de flujo es generalmente más alto que la mejora de la transformación; se puede iniciar con inversiones más pequeñas, pero por lo general requiere un tiempo más largo que una mejora de la transformación. Perseguir agresivamente la mejora de procesos de flujo antes que grandes inversiones en nueva tecnología de transformación.
Construir una mejora continua en el proceso	El esfuerzo para reducir los desperdicios y aumentar el valor es una actividad interna, incremental e iterativa, que puede y debe llevarse a cabo de forma continua.
Reducir la proporción de actividades que no agregan valor	Las actividades que no agregan valor dominan la mayoría de los procesos. Algunas de las actividades que no agregan valor generan valor para los clientes internos, por lo que no deben ser suprimidas sin tener en cuenta si estas actividades que no añaden valor son importantes en otras partes del proceso.

Fuente: elaboración propia basada en Koskela (1992).

Otros principios para considerar

Otros principios a tener en cuenta en el mejoramiento de la producción como resultado de la investigación realizada son propuestos por la autora para ser considerados como principios Lean Construction. Se muestran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Otros principios propuestos para ser considerados en LC

Principio	Descripción
Desarrollo, uso y mantenimiento de estándares	Se trata de diseñar, redactar y esquematizar, mejorar y sostener la manera en que se desarrollan los procesos, de tal manera que sirvan de base para su ejecución y mejoramiento continuo. Disponer de un estándar contribuye con la obtención de la calidad del producto o servicio. También contribuyen con la seguridad en el trabajo y el mejoramiento del flujo.
Conocimiento, selección y uso apropiado de herramientas LC	Hay un set de herramientas LC disponibles que se van implementando en el sistema de producción. Esto considera que el equipo de trabajo cuenta con la capacidad de seleccionar la herramienta adecuada al identificar la necesidad de su uso. Guarda importancia que los equipos de trabajo conozcan la herramienta y la utilicen correctamente.
Desarrollo de un sistema <i>pull</i>	El sistema <i>pull</i> pone en movimiento la producción en la medida en que la demanda requiera del producto o el servicio. Se produce si existe demanda y se requiere de los procesos de fabricación que hacen posible la elaboración de dicho producto o servicio.
Cumplimiento de la oferta de valor	Uno de los principios LC especifica: “Aumentar el valor de salida a través de la consideración sistemática de las necesidades del cliente” (Koskela, 1992). Sin embargo, se debe considerar la entrega del valor ofrecido, buscar que la brecha entre el valor especificado y el valor entregado sea cada vez más pequeña, de ahí que el cumplimiento de la oferta de valor sea un principio asociado con el proceso de producción.

Fuente: elaboración propia.

CULTURA. DESARROLLO DE UNA CULTURA DE PRODUCCIÓN SIN PÉRDIDAS CON ENFOQUE EN EL CLIENTE

El éxito de la utilización de LC depende de manera crítica del compromiso de las personas, del cambio de las tradiciones y la cultura (Sarhan y Fox, 2013a). Son las personas quienes llevan a cabo las estrategias de implementación; asumen el liderazgo y el compromiso para realizar una implementación LC exitosa y sostenible en el tiempo. La cultura recoge la experiencia y la manera de realizar el trabajo con las especificidades de la organización, que normalmente está influenciada por el sector productivo en que se desarrolla.

Al respecto, Mann (2005) describe que “la cultura en una organización es la suma de los hábitos de las personas en relación con la forma en que realizan su trabajo” (p. 3). En trabajos recientes sobre las barreras que se oponen a la implementación de LC (Cano, Delgado, Botero y Rubiano,

2015a; Mano, Lima, Costa y Cano, 2018) se muestra que una de las más fuertes es la “resistencia al cambio”, como un elemento de la cultura de la organización, en la cual se basan las personas para sustentar lo que se puede o no hacer en ella. Mann (2005) explica que es un error considerar que, para transformar los procesos de producción, una empresa se enfoque solamente en cambiar la cultura y, por el contrario, sugiere que el cambio sea el resultado de su sistema de gestión, de aprender de lo que se experimenta en la organización a partir de este sistema de gestión. La cultura es fundamental y, para cambiarla, debe cambiar el sistema de gestión y no pretender realizar el cambio de otra forma; de lo contrario, el cambio no sería sostenible.

De acuerdo con Rivera (2016), para lograr un cambio efectivo en la cultura organizacional, las personas deben estar convencidas, a partir de la experiencia en el desarrollo del sistema de gestión, de que los objetivos pueden ser alcanzados, que conceptos como liderazgo, compromiso y cooperación contribuyen al crecimiento personal mientras la organización también crece.

Las personas dentro de la organización deben ser conscientes del valor que se agrega al cliente en cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la organización. Se trata de entender que el sistema de producción se diseña tomando en cuenta los requisitos de valor del cliente para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor. Se promueve entonces una cultura que entiende el valor de un proceso más eficiente; una cultura que persigue constantemente la eliminación de actividades desperdiciadoras y que cree que el mejoramiento continuo es el medio para buscar la eficiencia del sistema de producción, agilizar el flujo de producción y la producción misma.

Al obtener un claro entendimiento del valor que se agrega al cliente por cada uno de los procesos en el sistema de producción, el concepto de cliente interno adquiere particular relevancia para el desempeño del sistema de producción, pues todas las acciones van dirigidas a satisfacer las expectativas del cliente. De esta manera, es importante no solo conocer las necesidades y expectativas del cliente, sino precisar los requerimientos relacionados con el trabajo a realizar.

El cliente interno corresponde a cada una de las personas en el sistema de producción que demandan bienes y servicios de procesos aguas arriba de su ubicación en la cadena de valor. Esto implica que el proceso que entrega estos bienes o servicios conozca las necesidades del proceso que se entrega —cliente interno— el cual, luego de realizar su trabajo, entrega al proceso siguiente (Rivera, 2016). Sin embargo, no se trata solo de conocer las necesidades de este cliente interno; se trata de establecer acuerdos de servicio en función de mejorar el flujo en la cadena de valor.

Como lo describen Ozkan *et ál.* (2017) en su trabajo, los clientes internos son uno de los capitales más valiosos de la organización. Tanto el nivel de satisfacción del cliente interno como su cualificación y actitud, entre otros aspectos, afectan directamente el desempeño organizacional. En este sentido, el desperdicio de talento es una actividad sin valor agregado y debe eliminarse de la organización para ser más ágil. Sugieren autores como Ozkan *et ál.* (2017) y Rivera (2016) que la organización debe realizar una cuidadosa selección de las personas de manera que puedan ser ubicadas en las posiciones de trabajo correctas al contar con una clara descripción del trabajo tanto para la contratación como para su desempeño.

TECNOLOGÍA. UTILIZACIÓN E INNOVACIÓN EN EL USO DE LA TECNOLOGÍA PARA LA GESTIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA PRODUCCIÓN

Tecnología, según el *Diccionario de la lengua española* (Rae, 2014), es el “conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico”; también se define como un “tratado de los términos técnicos”; “lenguaje propio de una ciencia o de un arte”, o como el “conjunto de los instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto”.

En este sentido, la tecnología no es solamente la aplicación de dispositivos, máquinas o herramientas; es la utilización del conocimiento en la forma de teorías y técnicas que permiten su aplicación para la solución de problemas y la satisfacción de necesidades específicas. Lean resalta la importancia de lograr mejoras en el sistema de producción a partir de la mejora continua de los procesos, involucrando sistemáticamente herramientas que vayan siendo aprendidas y utilizadas por las personas en los diferentes procesos.

Enfoque sistémico de Lean Construction

De acuerdo con Guirette y Arroyo (2011), el pensamiento sistémico (PS) permite adquirir una visión más crítica en razón de que permite una visión holística de la complejidad de la realidad, la cual considera múltiples elementos y sus interrelaciones. Así, se cambia la manera de entender los problemas, y se pasa de una visión lineal de los niveles de pensamiento (literal, inferencial y crítico) a una visión circular de estos, lo cual permite la realimentación, la transformación y la construcción constantes.

En 1956, Forrester propuso el uso del PS para el desarrollo de modelos administrativos. El PS es muy flexible; no da lugar a conclusiones deter-

minísticas y cerradas al considerar una sola parte del problema; considera todas las relaciones entre los elementos en interacción, en otras palabras, es necesario “ver el bosque y no solo el árbol”. Este es el marco para analizar interrelaciones en lugar de elementos de manera individual y, con base en estos conceptos, desarrollar la dinámica de sistemas (DS).

La DS es una herramienta que ayuda a comprender procesos complejos. Deming (1994) defiende que los procesos administrativos deben verificar la forma como ellos mejoran continuamente en ciclos de retroalimentación constantes; se debe poder ver todas las partes del sistema organizacional y cómo estas interactúan entre sí, considerando todos los elementos que entran y salen de los procesos y los factores internos y externos que influyen en el sistema. En los años 90, Senge, Klieiner, Roberts, Ross y Smith (1994) propusieron cinco disciplinas para el desarrollo organizacional en las empresas inteligentes; la quinta es el PS, el cual integra las otras cuatro disciplinas como un sistema dinámico que impulsa la comprensión de la complejidad en el desarrollo organizacional. Estas disciplinas son:

- **Maestría personal:** la gente con alto dominio personal alcanza las metas que se propone.
- **Trabajo y aprendizaje en equipo:** pensar juntos para tener mejores ideas.
- **Reflexión y conversación:** identificar y desarrollar nuestros modelos mentales.
- **Visión compartida:** las visiones personales alimentan la visión de la organización.
- **Pensamiento global:** generar pensamiento sistémico.

El éxito en las organizaciones depende de lograr la adecuada interacción entre factores clave para alcanzar el objetivo global y el PS es una herramienta apropiada. El PS usa modelos y mapas mentales (Guirette y Arroyo, 2011), que son formas o patrones básicos de percibir, pensar, valorar y actuar con base en una visión particular de la realidad. Una versión flexible de un modelo mental se logra integrando diferentes criterios como educación, valores, religión, moral, cultura, experiencia, costumbres, personalidad, etc. Con esta información integrada, se construyen posturas y se desarrollan actitudes con respecto a la realidad estudiada.

De acuerdo con lo anterior, para procurar un mejor desempeño de la GPC con el uso de LC, se pueden considerar estrategias con enfoque sistémico que impacten directamente el cumplimiento de la oferta de valor, como lo es el modelo de evolución, el SLC-EModel. En la medida que se logren hacer más flexibles los modelos mentales, se viabiliza la utilización de técnicas

que rompan con los métodos tradicionales de gestión. Esto se hace involucrando a las personas en la problemática particular. Con lo cual se busca romper con el uso y las costumbres propias de la construcción tradicional y propiciar en las personas el interés de llevar sus procesos de pensamiento a niveles más elaborados y a ser generadores de su propio conocimiento. Esto implica hacer una transformación de los procesos de pensamiento en la construcción y ser capaces de identificar indicadores que sean consistentes con el objetivo global y enfocar esfuerzos para que sea alcanzado (Rivera y Manotas, 2014).

¿Qué es la gestión Lean de producción de proyectos de construcción?

Una gestión Lean considera el engranaje de todos los elementos que participen del proceso de producción de proyectos de construcción. El articulador es el valor, especificado a partir de los requisitos e intereses del cliente. Una vez se identifica el valor, se configura la oferta de valor y el sistema de producción se ajusta a las condiciones que permitan crear y entregar el valor ofrecido. En el estudio desarrollado, se ha insistido en que el sistema de producción debe ser ajustado para cumplir estrictamente con la oferta de valor, ni más ni menos. Así que no es suficiente incrementar el valor a la salida del proceso; la creación de valor en sí misma pone en funcionamiento los procesos de producción; sin embargo, la atención debe estar en mejorar la eficiencia de estos procesos de producción para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor. No es suficiente con identificar la cadena de valor y eliminar las pérdidas. Es innegable que este es el fundamento de Lean; no obstante, subyacen otros criterios que involucran a las personas y a la organización, siendo relevante la gestión eficiente de la información, es decir, disponer de sistemas de información y tecnologías de comunicación como soporte del desarrollo de la GPC.

La gestión en una fase temprana del proyecto de construcción es considerada el factor más importante relacionado con la productividad laboral en construcción (Maloney, 1983). La principal característica asociada con la gestión, que se recomienda abordar en procesos de mejora, es la reducción de la variabilidad del flujo de trabajo (Liu, Ballard e Ibbs, 2011). Para estabilizar el flujo de trabajo en construcción, se ha introducido el sistema del último planificador (Last Planner System, LPS, por su sigla en inglés) (Ballard, 2000), que ha sido aplicado en la construcción para incrementar la productividad laboral. LPS es una herramienta diseñada para mejorar la fiabilidad del flujo de trabajo a través de mejores estrategias de planificación (González, Alarcón y Molenaar, 2009).

Entrega integrada de proyectos (IPD)

En el desarrollo tradicional de la gestión de proyectos de construcción, es común un bajo cumplimiento de las expectativas de desempeño en términos de tiempo, costo, calidad y, de manera crítica, su alcance, lo que ha llevado a la búsqueda de otras formas de mejorar el desempeño del proyecto. Uno de estos enfoques es la entrega integrada de proyectos (IPD) que, de acuerdo con Mesa *et ál.* (2016), es un sistema de entrega de proyectos que proporciona mejores indicadores de desempeño al lograr una mayor integración de su cadena de suministro. Este cambio de paradigma promueve la integración de los equipos de construcción en el proceso de diseño para lograr un proyecto maduro en la fase de diseños.

La construcción es una industria basada en proyectos, como se explicó, de manera que autores como Mesa *et ál.* (2016), El Asmar *et ál.* (2013), Cheng *et ál.* (2011), AIA National y AIA California (2010) sostienen que la IPD puede lograr una mayor colaboración entre los participantes del proyecto y, por tanto, obtener mejores indicadores de desempeño. Esto se alinea con una de las recomendaciones de Egan (1998), que se refiere a mejorar la colaboración e integración entre los participantes del proyecto, diseño y construcción para lograr proyectos que cumplan con las expectativas del cliente (Y.-W. W. Kim & Dossick, 2011), pues a esta falta de integración se le atribuye el pobre desempeño del proyecto con un impacto negativo en la fase de construcción.

El IPD integra personas, sistemas, estructuras y prácticas comerciales de manera colaborativa para incrementar el valor para el propietario, haciendo que los resultados del proyecto demuestren la reducción de los desperdicios y aumente la eficiencia a través de todas sus fases. Esa colaboración se materializa en acuerdos contractuales entre el propietario, los diseñadores, el constructor y los proveedores, los cuales buscan aumentar el valor para el propietario, reducir el desperdicio y maximizar la eficiencia en todas las fases de diseño y construcción (AIA, 2010).

De otra parte, la integración del IPD y de conceptos y principios Lean ha dado lugar al desarrollo del Lean Project Delivery System (LPDS) (Ballard, 2000), que es un método para gestionar el proyecto a lo largo de su línea de vida (Curt, 2007), incluyendo criterios de integración y colaboración de la misma manera que el IPD. Ambos modelos exigen cambios en la manera actual de realizar los proyectos de construcción. La planificación del proyecto adquiere la mayor relevancia entre sus fases de desarrollo y se obtiene una mayor integración de los clientes en cada una de las fases. Adicionalmente, un mejor desarrollo de procesos de planificación y control de la producción del proyecto mismo.

Mesa (2016) sostiene que la importancia de LPD radica en que, además de integrar a las personas, los sistemas, las estructuras y las prácticas comerciales de una organización de proyectos colaborativa, un contrato relacional es una herramienta clave para optimizar los resultados del proyecto, aumentar el valor para el propietario y reducir los desperdicios.

Lean Project Delivery System (LPDS)

El esquema tradicional de entrega de proyectos presenta deficiencias en los procesos de diseño y construcción, las cuales se reflejan en sobrecostos, retrasos, cuestionamientos de calidad, entre otras. De acuerdo con Forbes y Ahmed (2011), el diseño pobre y la baja calidad de la documentación del proyecto son un factor importante en la reducción del rendimiento y la eficiencia de los proyectos de construcción en general. El LPDS, o Sistema Integrado para la Gestión Lean de Proyectos de Construcción, contribuye a mejorar las deficiencias en la ejecución del proyecto, pues supone que el trabajo del equipo del proyecto no solo proporciona lo que el cliente desea, sino que ayuda al cliente a decidir lo que desea (Ballard, 2000; Ballard y Howell, 2003). Su enfoque está en entregar un producto, maximizar el valor y minimizar el desperdicio.

El LPDS se considera un “sistema de producción basado en proyectos” porque es un sistema de producción temporal. A diferencia de los sistemas tradicionales de entrega de proyectos, LPDS pregunta qué debe hacerse y quién es el responsable de la tarea al comienzo del proyecto (Schöttle, 2015). Mientras que el esquema tradicional de la construcción separa las funciones de los participantes del proyecto, el LPDS considera las actividades de los participantes como un proceso continuo para la gestión de proyectos con el fin de alcanzar tres objetivos fundamentales según Koskela (2000): la entrega del producto de acuerdo con las expectativas del cliente, maximizar el valor y minimizar los desperdicios.

El modelo se presenta en una serie de fases que reflejan la conducta lineal y la iterativa que se llevan a cabo en los procesos de diseño y construcción, representadas por triángulos superpuestos que muestran la influencia de unos sobre otros, lo que exige la articulación entre los diversos grupos de interés, Figura 2.6. Forbes y Ahmed (2011) explican que “la articulación del trabajo proporciona la base para el proceso y prepara el escenario para el control de la producción”.

La articulación del trabajo es un concepto desarrollado por el Instituto Lean Construction (LCI) para indicar el diseño del proceso. Se trata de subdividir el trabajo en partes del proyecto que se completan en una unidad de producción para enviar a la siguiente. De esta manera, se promueve el flujo

de trabajo y el rendimiento y se cuenta con un trabajo organizado y ejecutado en beneficio del proyecto.

“Los planes se actualizan continuamente de una manera proactiva en lugar de modo reactivo, mirando hacia adelante en lugar de hacia atrás” (Ballard, 2000).

El LPDS es un sistema con funciones interdependientes, reglas para toma de decisiones, procedimientos para la ejecución de las funciones y herramientas de implementación de *software* para el desarrollo del proyecto. “Consta de 14 módulos, 11 de los cuales se organizan en 5 tríadas que van desde la definición del proyecto hasta su desmantelamiento, uno de control de producción y otro de estructuración del trabajo, ambos concebidos para extenderse a través de todas las fases del proyecto, y un módulo final de aprendizaje, que une el extremo de un proyecto con el comienzo de la siguiente” (Ballard, 2008).

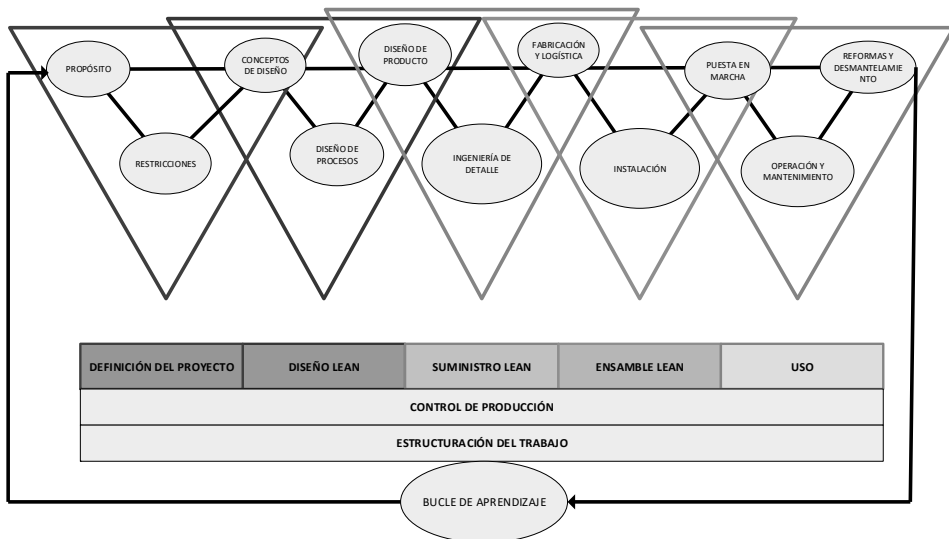


Figura 2.6. El LPDS.

Fuente: elaboración propia basado en el Lean Project Delivery System (Glenn Ballard, 2000; 2008).

De acuerdo con Mossman & Ballard & Pasquire (2010), los esfuerzos del LPDS se centran en conseguir un flujo de trabajo confiable, primero, y, más adelante, lograr mejorar la productividad. Todo el LPDS se enmarca en un bucle de aprendizaje que permite que el equipo aprenda, y se mejore el proceso para el siguiente proyecto (Ballard, 2000, 2008).

El Lean Project Delivery System seis fases de producción. LPDS-6F

En la investigación realizada se desarrolló una adaptación del LPDS; adaptación que se ha denominado LPDS-6F debido a que se configura en seis fases en la línea de vida del proyecto de construcción, con una fase adicional a las definidas en el LPDS de Ballard (2000, 2008). Se propone, entonces, una reconceptualización del LPDS que considera una mayor interacción entre los módulos del LPDS original, así como con los nuevos módulos que lo complementan. La sexta fase integrada al LPDS corresponde a aquella en la cual se realiza la alteración del activo físico, debido a la necesidad de adaptar sus condiciones de funcionamiento a exigencias normativas, remodelación o restauración, entre otras, hasta llegar al desmantelamiento y la disposición final.

El LPDS-6F está conformado por diecisiete módulos: en las seis fases correspondientes a la línea de vida del proyecto se cuenta con catorce módulos, un módulo correspondiente a los procesos de la organización que soportan el proyecto, un módulo del sistema general de planificación y control del proyecto y la estructuración del trabajo y uno para el proceso de aprendizaje que, a su vez, considera tres bucles de aprendizaje.

El LPDS-6F exige la interacción con la organización, con los procesos que soportan y apoyan la ejecución del proyecto en todas sus fases. El proceso de producción del proyecto considera el tipo de entorno de producción en que este se desarrolla; de esta manera, se considera la participación de los clientes como elemento determinante de la configuración del proyecto y de su forma de gestionarlo y producirlo.

También en el modelo del LPDS-6F está incluida explícitamente la filosofía LC como la tríada que relaciona a las personas y la cultura, los principios y la tecnología para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor para el cliente. Así, más que la creación *per se* de valor, el modelo se concibe para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor, pues al integrar los requisitos del cliente en el diseño del sistema de producción, se crea valor.

El modelo considera tres bucles de aprendizaje que integran las tres categorías involucradas en él: las personas, el sistema de producción, la organización y el respectivo soporte que dispone para el desarrollo del proyecto con la implementación de la filosofía LC. El primer bucle conecta la filosofía LC con el sistema de producción; el segundo, al sistema de producción con la organización y, el tercer bucle, a la filosofía LC con la organización; todos ellos constituyen un sistema de aprendizaje constante y conjunto.

A continuación, se presentan las fases del LPDS-6F, Figura 2.7. Se muestran las relaciones entre los módulos. Más adelante, en las Figuras 2.15, 2.16 y 2.17 se muestran las relaciones entre las seis fases de la producción

del proyecto que permiten entender la interacción sistémica de estas fases, en la que se entiende ampliamente la relevancia de la fase de planificación del proyecto constructivo para su éxito.

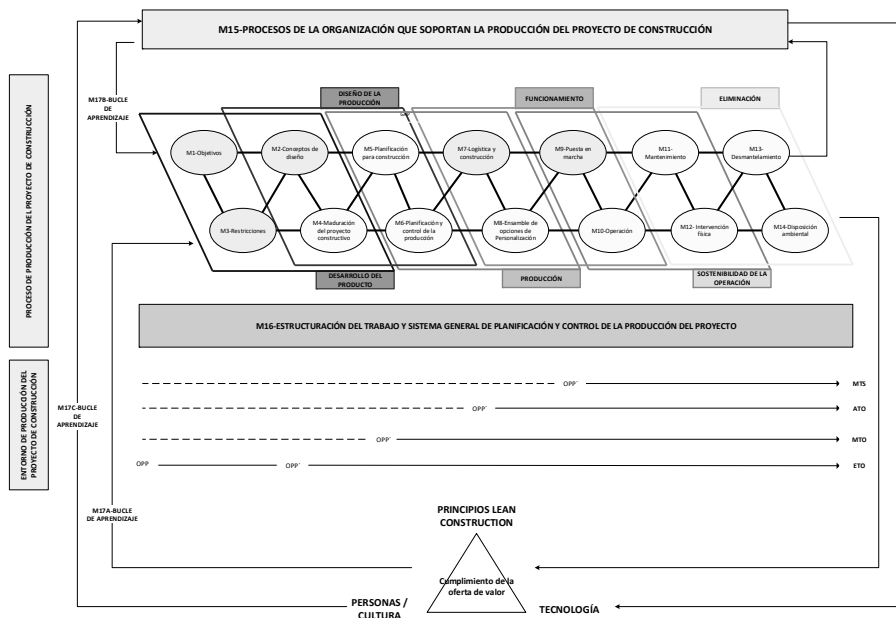


Figura 2.7. Configuración inicial del LPDS-6F

Fuente: elaboración propia basada en Ballard (2008).

Fase I. Desarrollo del producto. Planificación del proyecto constructivo

El proyecto constructivo incluye todo el trabajo que se debe hacer para obtener el diseño completo del producto; sin embargo, la fase de diseño del producto es la más importante y menos explorada. En esta fase, se define el diseño del producto; se integran conceptualmente a ese diseño condiciones que deben ser consideradas en la construcción, operación y desmantelamiento, lo que lleva a integrar una visión 7D⁶ de desarrollo del producto.

Desde la concepción del producto es muy importante tomar en consideración sus alcances y su integración con las otras fases para identificar con precisión la adopción de herramientas y conceptos Lean para cada una de las fases. Esto contribuye a simplificar el esfuerzo de identificar problemas desde el diseño y apoyar la toma de decisiones en el campo.

⁶ Building Information Modeling (BIM), desde la concepción del modelo en 3D, la programación 4D, el control del costo de construcción 5D, la integración de criterios de sostenibilidad 6D y la gestión del mantenimiento 7D.

Esta fase se compone de los módulos M1- Objetivos, M2- Restricciones, M3- Conceptos de diseño y M4- Maduración del proyecto constructivo, maduración de los diseños⁷, Figura 2.8. La maduración de los diseños del proyecto es muy importante, pues de este módulo depende una adecuada planificación en términos de tiempo, recursos y costo. Los objetivos del proyecto son definidos claramente y, con base en ellos, se establecen los criterios a considerar en el diseño con base en la identificación de requisitos del cliente. Los objetivos y los conceptos de diseño dan lugar a la identificación de las restricciones generales que impactan el proceso de diseño.

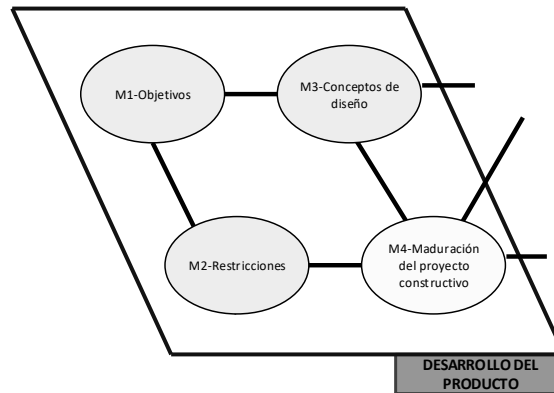


Figura 2.8. Módulos de la fase I. Desarrollo del producto

Fuente: elaboración propia.

Los tres primeros módulos aportan la información primaria para la realización de los estudios de factibilidad, y el proyecto arquitectónico es desarrollado con ayuda del modelo virtual. Por medio de M3 y M4 se conecta esta fase con la siguiente. A partir de esta fase, se desarrollan los proyectos que corresponden con un entorno ETO. El producto de esta fase son los diseños completos del proyecto a construir.

Fase II. Diseño de la producción

En esta fase, denominada también “Estructuración para construcción”, el M3- Conceptos de diseño y el M4- Maduración del proyecto constructivo son los módulos de la fase anterior que se conectan con M5- Planificación para construcción en esta fase y una interacción con M6- Planificación y control de la producción de construcción, Figura 2.9. Esta fase considera la planificación de la construcción. La maduración de los diseños recibe infor-

⁷ Maduración: Acción de madurar. Efecto de madurar.

mación de los módulos M2- Restricciones y M3- Conceptos de diseño para la obtención de los diseños; en el ámbito Lean, hace uso de la herramienta BIM para la obtención del modelo virtual, y en esta fase se integra los diseños técnicos del proyecto con el plan de construcción, el plan de costos asociados a la producción de cada una de las actividades que completan el alcance del proyecto; se diseña el pliego de condiciones para la contratación y se lleva a cabo el proceso de contratación mismo. El producto de esta fase es el contrato de construcción.

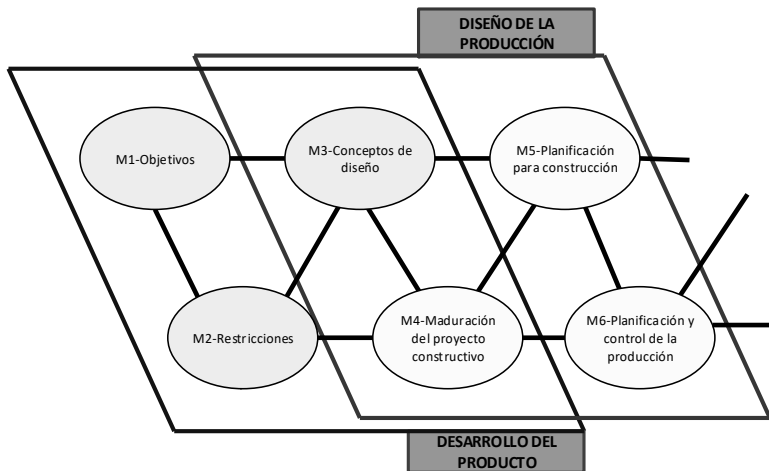


Figura 2.9. Módulos de la fase II. Diseño de la producción

Fuente: elaboración propia.

Fase III. Producción o construcción

M3- Conceptos de diseño, M4- Maduración y M5- Planificación de la construcción son los módulos involucrados en la fase de planificación para la construcción que permiten desplegar la fabricación del producto. Los módulos de esta fase de producción o construcción son M6- Planificación y control de la producción, M7- Logística y construcción y M8- Ensamble de opciones de personalización, Figura 2.10. Con los diseños completos, el modelo virtual que contiene los diseños técnicos, el plan de construcción, el plan de costos y el contrato de construcción, se desarrolla la construcción que se lleva a cabo con la gestión del M6- Planificación y control de la producción de la construcción. Es este sistema el que pone en funcionamiento las actividades de producción, las cuales requieren estar articuladas con el sistema logístico y, por medio de él, con la cadena de suministro del proyecto.

El ensamble de opciones de personalización se lleva a cabo de acuerdo con el sistema de planificación y control de la producción y requiere también de la articulación con el sistema logístico y la cadena de suministro del proyecto. Una vez se han ensamblado las opciones de personalización seleccionadas por el cliente, el producto está listo para su entrega y puesta en marcha para cumplir los fines para los que fue concebido. Esta puesta en marcha inicia la operación del activo físico. En esta fase de desarrollan los proyectos definidos para entornos MTO, ATO en un desarrollo intermedio de la fase y MTS a la terminación de la fase. El producto de esta fase es la obra terminada.

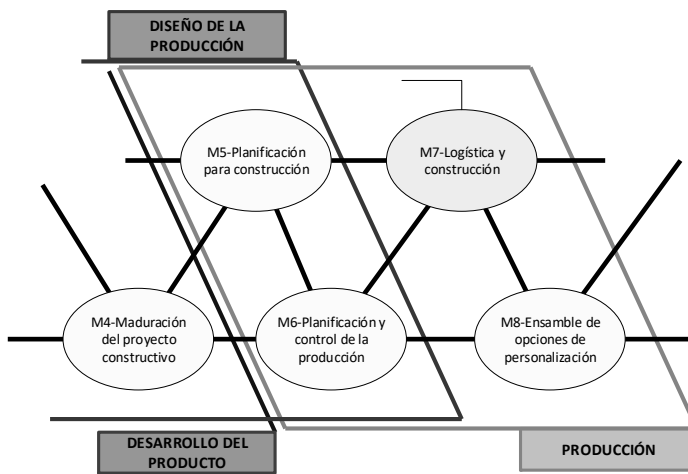


Figura 2.10. Módulos de la fase III. Producción o construcción

Fuente: elaboración propia.

Fase IV. Funcionamiento. Puesta en marcha y operación

Los módulos de entrada son M6- Planificación y control de la producción, M7- Fabricación y logística, M8- Ensamble de opciones de personalización que completan la producción del producto para desarrollar la fase IV. En esta fase se llevan a cabo las tareas relacionadas con el M9- Puesta en marcha y M10- Operación, Figura 2.11. Se ponen a punto todas y cada una de las facilidades de la edificación para entrar en operación. La operación contiene tareas que permiten el adecuado uso del producto de acuerdo con el diseño y, por lo tanto, de acuerdo con las expectativas del cliente.

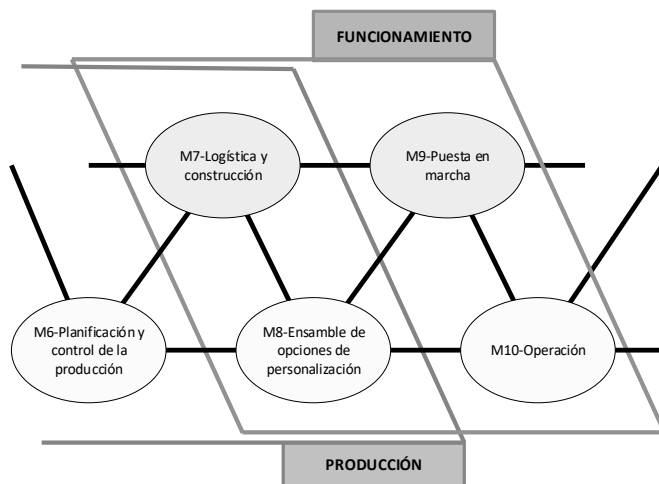


Figura 2.11. Módulos de la fase IV. Funcionamiento: puesta en marcha y operación.

Fuente: elaboración propia.

Fase V. Sostenibilidad de la operación

Con los módulos M9- Puesta en marcha y M10- Operación, se hace uso del producto; en adelante, para garantizar el buen funcionamiento del activo físico; se desarrollan las actividades relacionadas con el módulo M11- Mantenimiento, las cuales se requieren a causa de la operación continua del activo físico, Figura 2.12. Estas acciones de sostenimiento se garantizan con la intervención de mantenimiento de cada uno de los sistemas que componen el activo. Más adelante, cuando el activo físico requiera de una intervención que actualice sus condiciones de operación, se desarrolla el módulo M12- Intervención física a fin de mantener las condiciones originales para las cuales se construyó el activo. El producto de esta fase es el activo físico funcionando, el desarrollo del plan de mantenimiento y el plan de intervención física.

Fase VI. Eliminación. Finalización de la vida útil, desmantelamiento y disposición final

Una vez las condiciones de servicio del edificio ya no son satisfactorias para el desempeño de las funciones originales para las cuales se construyó, la edificación se desmantela. En este desmantelamiento se conducen acciones de reciclaje, reutilización y disposición final que contribuyan a reducir el impacto ambiental de la eliminación del edificio. En esta fase, las acciones de los módulos M11- Mantenimiento y M12- Intervención física son insuficientes para garantizar una adecuada operación del activo físico, se desarrollan los módulos M13- Desmantelamiento y M14- Disposición final con criterios ambientales para tal fin, Figura 2.13. Esta es la última fase, aquella

que completa el ciclo de vida del proyecto, la cual considera los alcances definidos en el módulo M1- Objetivos.

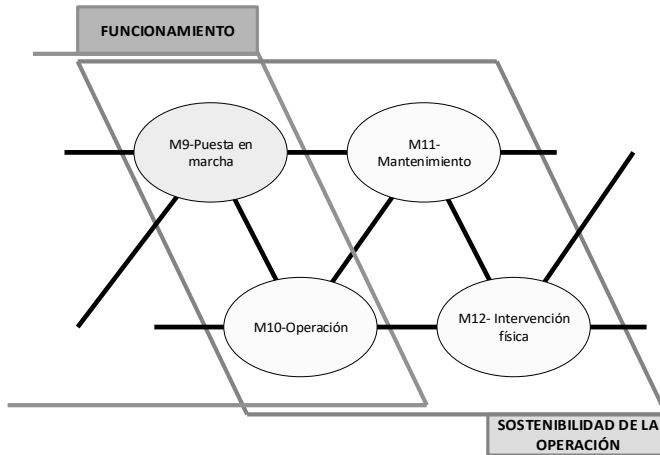


Figura 2.12. Módulos de la fase V. Sostenibilidad de la operación

Fuente: elaboración propia.

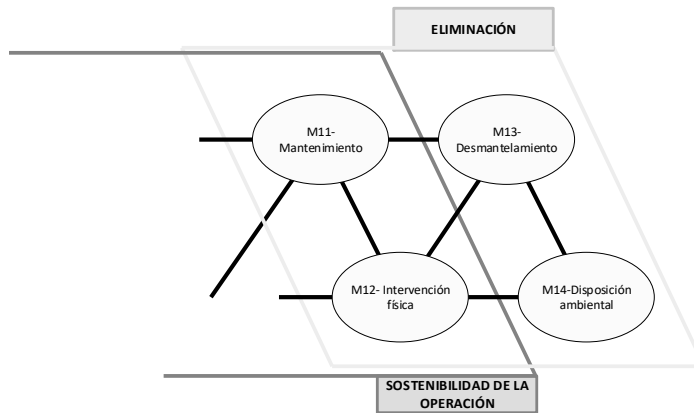


Figura 2.13. Módulos de la fase VI.

Eliminación: finalización de la vida útil, desmantelamiento y disposición final.

Fuente: elaboración propia.

M15- Procesos de la organización que soporta el proyecto

La organización de construcción desarrolla su actividad comercial con base en proyectos, así que cuenta con procesos de apoyo al proyecto, además de aquellos procesos propios de la gestión empresarial. Estos procesos se deben alinear con las necesidades del proyecto de tal manera que contribuyan con

el flujo de producción. En este módulo, se entiende ampliamente el concepto de cliente interno, se identifica la cadena de valor del proceso y se sostienen acciones continuas de eliminación de desperdicios con el objetivo de agregar valor principalmente al cliente interno.

M16- Estructuración del trabajo y sistema general de planificación y control de la producción del proyecto

El sistema general de planificación y control de producción del proyecto se despliega a lo largo de la línea de vida del proyecto. Se estructura el trabajo a realizar en cada una de sus fases, se diseña el plan maestro de ejecución del proyecto y se establecen las rutinas de seguimiento, control y direccionamiento del avance del proyecto con una visión de conjunto.

M-17- Aprendizaje

Este módulo contiene tres bucles de aprendizaje. Cada uno de ellos integra: entendimiento de los procesos, entendimiento y aprendizaje conjunto, entendimiento y solución de problemas en conjunto, así como prácticas de mejoramiento continuo. El proceso de producción del proyecto requiere de procesos de la organización de manera directa y de alguno de ellos de manera indirecta. Se construye un ciclo de aprendizaje con el desarrollo del proyecto y cada vez que cada uno se completa. No se establece un orden de prioridad para el desarrollo de los bucles; estos se configuran y operan de manera simultánea; sin embargo, la experiencia de practicantes sistematizada en la investigación realizada muestra que la implementación de la filosofía Lean se inicia en la producción del proyecto y, desde él, se demanda de la organización el funcionamiento de los procesos que la producción requiere. Estos bucles son:

Bucle 1. M17A- Implementación de la filosofía LC.

Producción del proyecto

El diseño del sistema de producción del proyecto es el resultado del entendimiento del valor desde el punto de vista del cliente. De esta manera, en la producción del proyecto en todas sus fases se van integrando los elementos de la filosofía Lean que hacen de la producción un proceso más eficiente. Esto implica contar con personas que crecen en la filosofía, que se desarrollan para ser líderes en cada una de sus actuaciones y se forman en habilidades para el trabajo en equipo.

Bucle 2. M17B- Procesos de la organización que soportan el proyecto.**Producción del proyecto**

La mejora de la producción requiere alinear los procesos de la organización con el flujo de producción para configurar el sistema de producción. Un sistema que integra a todas las partes involucradas de manera eficiente y en función de una contribución también eficiente a la producción. El concepto de cliente se cambia hacia el cliente interno, se identifica el valor desde el punto de vista de este cliente, lo que lleva a la mejora continua de las operaciones que agregan valor, se mejoran las operaciones contributivas y se identifican y eliminan los desperdicios en los procesos productivos.

La principal acción que se realiza entre los procesos de la organización y la producción es el establecimiento de compromisos que se consolidan en los acuerdos de servicio; se fortalece la comunicación, y los sistemas de información se diseñan para apoyar el flujo de producción. Esta alineación parte del entendimiento del proceso de producción del proyecto, de la colaboración entre todos los agentes del sistema de producción a partir del desarrollo de sus habilidades de liderazgo y de la formación, el entrenamiento y el empoderamiento de la responsabilidad que implica su participación en el sistema.

Bucle 3. M17C- Implementación de la filosofía LC.**Procesos de la organización que soportan el proyecto**

En la organización, se desarrollan procesos de implementación de la filosofía, desplegada en cada una de sus dimensiones: principios, herramientas y el desarrollo de una cultura que entienda los requisitos de valor del cliente, que persiga los desperdicios y que gestione constantemente el mejoramiento continuo.

LA IMPORTANCIA DE LA FASE I: DESARROLLO DEL PRODUCTO.**PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO CONSTRUCTIVO**

En la Figura 2.14, se puede apreciar en la curva (3), que corresponde a la producción tradicional del proyecto, que cuando el desarrollo del proyecto constructivo se realiza tardíamente provee un proyecto inmaduro para la fase de planificación para construcción y para la fase de construcción. Esta condición de inmaduro requiere de mayores esfuerzos con costos adicionales por el hecho de realizarse en fases avanzadas del proyecto. Por el contrario, en la medida en que el proyecto constructivo goza de una maduración completa en las fases tempranas, curva (4), de manera equivalente

a como se desarrolla un proyecto haciendo uso de la metodología BIM, se reducen los reprocesos y, por tanto, los costos corresponden con cada una de las fases.

La producción requiere de un proyecto constructivo maduro, cuya información sea de un alto nivel de calidad, lo que permite el buen desempeño de los otros módulos. Esta es la fase más importante en el proceso de producción y corresponde a los módulos M3 y M4 en los cuales se desarrolla el producto, Figura 2.15. Con un producto completamente diseñado, se obtienen los elementos de la fase de planificación para producción también con un alto nivel de calidad: el programa, el presupuesto, el pliego de condiciones y un contrato de construcción que permita una gestión contractual de muy alta calidad. En esta Figura 2.15, la autora desarrolla conceptualmente las relaciones entre los módulos del proyecto, lo que permite entender el LPDS-F6 como un proceso cíclico y sistémico de producción y gestión de proyectos de construcción.

El desarrollo de un sistema de producción LC promete obtener un producto de mejor calidad, logrado con mejores indicadores de resultados.

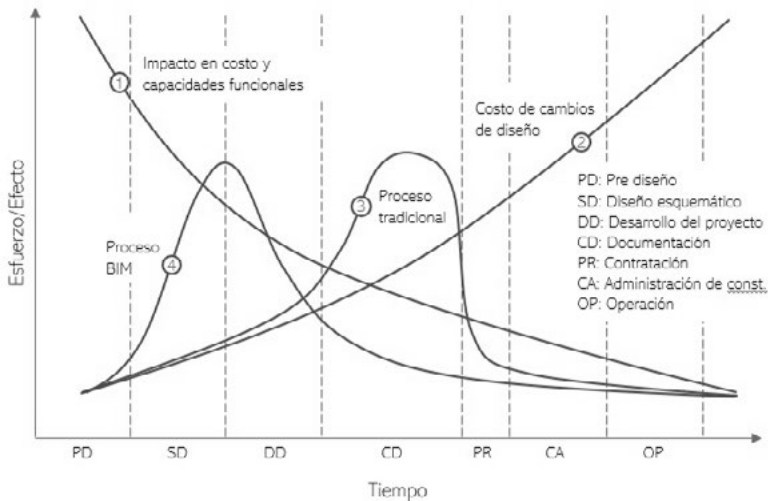


Figura 2.14. Curva de MacLeamy, introducida en la Mesa Redonda de Usuarios de la Construcción (CURT) “Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design and Construction and Operation” (White Paper-1202, agosto de 2004).

Fuente: Ilustración tomada de Jesús Rodríguez⁸

⁸ <https://retaintechologies.com/como-reducir-coste-tiempo-ejecucion-de-obras-bim/>

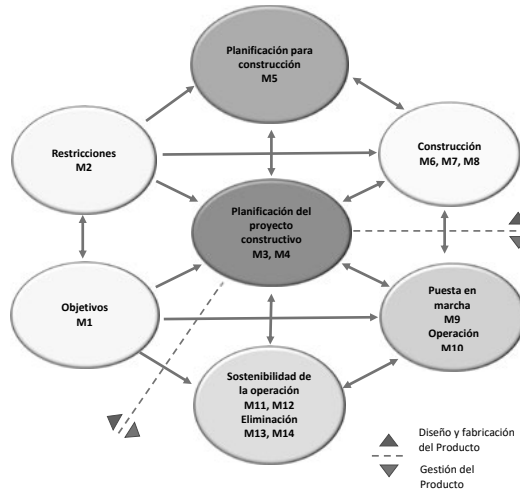


Figura 2.15. Relaciones entre las fases del proyecto. Basado en el Lean Project Delivery System (LPDS) (Ballard, 2008).
Fuente: elaboración propia.

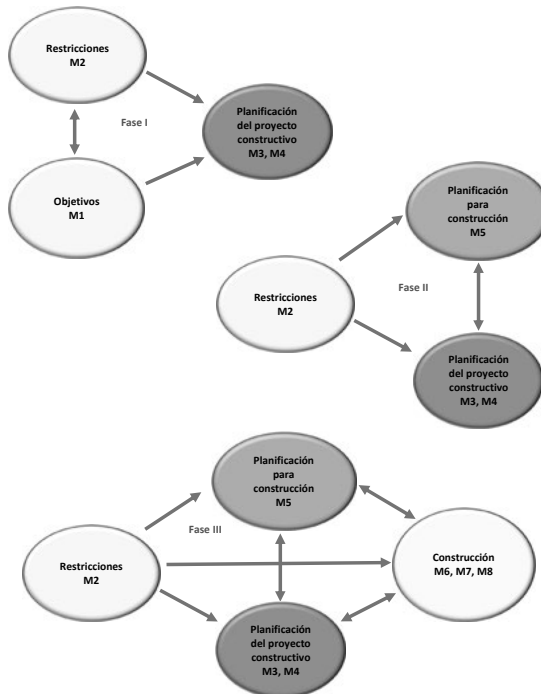


Figura 2.16. Interacción entre las fases del proyecto: I. Desarrollo del producto; II. Diseño de la producción; III. Construcción.
Fuente: elaboración propia.

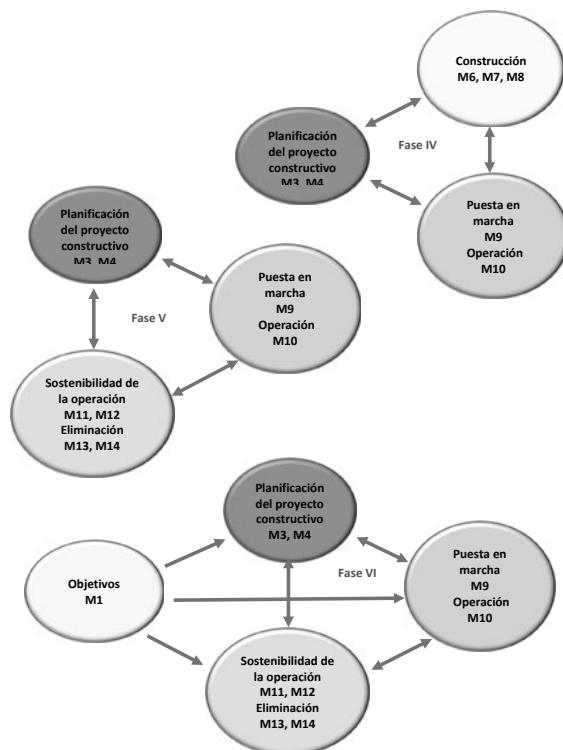


Figura 2.17. Interacción entre las fases del proyecto: IV. Funcionamiento; V. Sostenibilidad de la operación; VI. Eliminación.

Fuente: elaboración propia.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LEAN CONSTRUCTION

Después de casi un cuarto de siglo de la utilización de Lean en la industria de la construcción (Koskela, 1992), se evidencia el aumento del uso de LC en empresas de construcción en todo el mundo (Aziz y Hafez, 2013). Desde 1993, el International Group for Lean Construction (IGLC) reporta diversas investigaciones que muestran el impacto de LC en el mejoramiento del desempeño del proyecto de construcción. Sin embargo, de acuerdo con Limón (2015), aún no se perciben estos beneficios de manera integral, debido a que todavía no es fácil evaluar si los beneficios obtenidos son consecuencia de la utilización de LC. En la literatura académica, se identifican algunas herramientas que evalúan el desempeño de LC en diversos aspectos. Entre ellas, se cuenta con modelos de madurez, modelos de evaluación de prácticas Lean, marcos de evaluación del cumplimiento de principios, uso de herramientas y aspectos asociados con las personas relacionadas con LC.

Se identifican ocho iniciativas de evaluación de LC, seis de ellas reportadas en Cano *et ál.* (2017), Limón (2015) y una más reciente de Sainath, Koshy y Raghavan (2018), para extraer de ellas elementos que contribuyan al desarrollo de una herramienta para la evaluación y evolución de LC en la GPC que permita alinear a las personas, los procesos de producción y el soporte de la organización con sus procesos empresariales para la obtención de la entrega del valor ofrecido.

TRABAJOS RELACIONADOS

De acuerdo con Briede y Rebolledo (2010), Garay-Hernández, Espinoza, Martínez y Castro-Careaga (2013) y Wendler (2012), un estudio de mapeo sistemático de la bibliografía es un enfoque para realizar un estudio preciso del estado del arte sobre el tema de interés e identificar trabajos relacionados. El mapeo es una forma de revisión de la literatura que aborda diversas facetas de un mismo tema para identificar y analizar información relevante sobre el tema de interés.

Para la identificación de trabajos relacionados, se adoptaron dos puntos de vista: uno, sobre las herramientas de evaluación LC en sí mismas y, otro, con respecto a las metodologías para auscultar el estado del arte e identificar las oportunidades de investigación en el tema de interés. No se hallaron referencias de revisiones del estado del arte sobre evaluación de LC. De otra parte, se conocieron dos trabajos relacionados con madurez: uno en el que se revisa la literatura para conocer el estado del arte sobre los modelos de madurez (MM) y otro sobre diseño de MM. El valor de estas publicaciones está en el uso de la metodología para conducir una búsqueda bibliográfica de este tipo. Al no disponer de un estudio relacionado con la evaluación de LC fue relevante adelantar el estudio de mapeo con este propósito. Un primer trabajo realizó una revisión sistemática de literatura sobre MM (Wendler, 2012).

Se desarrolló el método de mapeo de bibliografía, que comprobó que los MM son herramientas reconocidas para identificar el nivel de implementación de estrategias de mejoramiento de la calidad de procesos. Y también mostró que cualquier desarrollo respecto de una herramienta de evaluación de madurez debe estar complementado con un proceso de validación. El trabajo de Becker *et ál.*, (2009) presenta una serie de criterios, con enfoque científico, para el desarrollo de MM con énfasis en tecnología de información (TI). Es una guía para realizar diseños metódicos y evaluaciones de madurez en otros dominios; su valor radica en la mirada a los enfoques de

madurez y al modelo general para la construcción de MM, a partir de una revisión de referencias con respecto de los requerimientos para su desarrollo. Los principales hallazgos de la investigación incluyen la clasificación de la bibliografía estudiada en áreas temáticas para seleccionar los elementos que participan de la madurez y evolución de LC, la identificación de modelos o herramientas específicas para la evaluación de LC, otros modelos que pueden ser adaptados para evaluar LC y las tendencias de las publicaciones a partir de las primeras iniciativas hasta hoy.

RESULTADOS. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN

No se encontró ningún artículo que revisara la literatura acerca de las iniciativas de evaluación de LC. Sin embargo, se identificaron iniciativas de evaluación referenciadas en tesis de maestría y doctorado. A continuación se hace referencia al estudio realizado por Cano *et ál.* (2017).

IDENTIFICACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA EVALUAR LC

En el estudio, se identificaron quince referencias relacionadas con la evaluación de LC, de las cuales se destacan ocho iniciativas de evaluación de LC (Tabla 2.9). Cuatro de estas herramientas corresponden a instrumentos para calificar el cumplimiento de prácticas Lean reportadas en cinco referencias: Etges *et ál.* (2013), Hofacker *et ál.* (2008), Tezel y Nielsen (2013), Valente, Novaes, Mourão y Neto (2012) y Vieira, De Souza y Amaral (2012). En Nesensohn (2014), se desarrolla un modelo de madurez de LC enfocado a organizaciones en las que el proyecto de construcción forma parte de procesos y sistemas como un factor de evaluación. Limon (2015) desarrolla un modelo de medición de desempeño del proyecto que soporta la implementación de Lean Construction en Noruega, y Sainath *et ál.* (2018) desarrollan un modelo de factor ponderado para evaluar la madurez general a nivel de proyecto y organización.

Tabla 2.9. Iniciativas de evaluación de Lean Construction

Autores	Publicación	Descripción
Hofacker, A., Fernández de Oliveira, B., Gehbauer, F., Darte Freitas, M. do Carmo, Mendes Jr, R., Santos, A., Kirsch, J.	Rapid LC Quality Rating Model (2008).	Es una herramienta de evaluación rápida de la aplicación de los principios LC en la etapa de construcción. A través del desempeño de la obra se puede conocer el desempeño de la organización respecto a LC.
Vieira, L.; De Souza, L. O.; Amaral, T.	Application of the Rapid Lean Construction-Quality Rating Model to Engineering Companies (2012).	Este modelo es una mejora del modelo original Rapid LC Quality (RLCQ). Utiliza el RLCQ para evaluar la aplicación de los principios de Lean Construction a dos empresas constructoras en el estado de Goiás (Brasil).
Valente, C.; Novaes, C.; Mourão, C.; B. Neto, J.	Lean monitoring and evaluation in a construction site: a proposal of Lean (2012).	Establece lineamientos para evaluación en la obra sobre la implementación y consolidación de LC.
Etges, B.; Saurin, T.; Bulhões I.	A protocol for assessing the use of Lean Construction practices (2012).	Se trata de un protocolo para la evaluación del uso de las prácticas de LC en obras.
Tezel, A.; Nielsen, Y.	Lean Construction Conformance among Construction Contractors in Turkey (2013).	Este trabajo presenta y analiza los resultados de los niveles de conformidad LC entre los contratistas. Establece sus fortalezas y debilidades con respecto de LC.
Nesenshon, C.	An innovative framework for assessing Lean Construction maturity (2014).	Desarrolla un marco de evaluación de la madurez que permite a las organizaciones de construcción medir la distancia entre el lugar donde se encuentran y donde ellas quieren estar, en función de su madurez LC.
Yeshwant Sainath, Koshy Varghese, and Raghavan	Framework for progressive evaluation of Lean Construction maturity using multi-dimensional matrix (2018).	La gestión de Lean Construction abarca tres etapas: la manifestación física (basada en actividades), la manifestación conductual (basada en la cultura) y la manifestación estratégica (a largo plazo). Identifica factores distintivos de la madurez relacionados con las tres etapas mencionadas. Se desarrolla un modelo de factor ponderado para evaluar la madurez general a nivel de proyecto y organización.
Limon, D.	Medición de la construcción Lean. Un modelo de medición del rendimiento que respalda la implementación de prácticas Lean en la industria de la construcción noruega (2015).	Desarrolla un modelo de medición de desempeño del proyecto que soporta la implementación de Lean Construction. Establece relación entre las prácticas utilizadas y los efectos esperados. Propone una herramienta de calificación para facilitar una evaluación comparativa interna de los proyectos.

Fuente: elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DE OTRAS HERRAMIENTAS O ARTEFACTOS QUE POTENCIALMENTE SE UTILICEN EN LA EVALUACIÓN DE OTROS ASPECTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LC

A continuación, se hace referencia a ocho iniciativas de evaluación de principios Lean, ocho sobre uso de herramientas y doce referencias relacionadas con diferentes aspectos sobre las personas en relación con LC.

Las iniciativas de evaluación se concentran en verificar el cumplimiento de prácticas relacionadas con la aplicación de los principios LC. Estas prácticas se obtienen principalmente de consultas a expertos, y el cumplimiento de ellas se verifica con la aplicación de instrumentos como entrevistas, encuestas y observación directa. En esta categoría se destacan principalmente tesis de maestría y algunos autores que presentan resultados de estudios de caso. Las referencias corresponden a los siguientes autores: Carvalho (2008), (F. De Carvalho, 2012), Costa *et ál.* (2015), Huang *et ál.* (2013), Shang (2013), Shang y Pheng (2012), Soto (2016) y Vilasini, Neitzert y Rotimi (2011). Se destaca el trabajo de Soto (2016), que presenta un modelo de madurez de la aplicación de los principios LC con el cual pretende evaluar aspectos que se cruzan de acuerdo con los diferentes alcances y niveles organizacionales en el desarrollo de la fase de construcción.

Otras iniciativas de evaluación se concentran en el desempeño de Last Planner System (LPS) y la manera como se presentan y superan las dificultades para la implementación, la ejecución de mejoras en la productividad, la reducción de la variabilidad y la eficacia de las estrategias de implementación (Alarcón, Diethelm, Rojo y Calderón, 2008; Cortez, Cortez, Garcia, y Rodriguez, 2009; Jünge, Kjersem, Shlopak, Alfnes y Halse, 2015; (D. Kim & Park, 2006; Ogunbiyi, Oladapo y Goulding, 2011; Ogunbiyi *et ál.*, 2014; Pavez, Gonzalez, y Alarcon, 2010; Salem, Solomon, Genaidy y Minkarah, 2006). Una de estas evaluaciones amplía su alcance a herramientas como gestión visual, reuniones diarias, estudios de inicio, 5S y prueba de fallas de calidad (Salem y Zimmer, 2005).

Los procesos de validación de las herramientas son escasos, aunque algunas herramientas se aplican en campo. Los resultados de la aplicación de herramientas se presentan en las referencias como casos de estudio. En general, los autores reconocen que se requiere de más aplicaciones para consolidar resultados que conduzcan a tomar decisiones más precisas sobre los procesos de evaluación.

Otra de las iniciativas de evaluación permite identificar las capacidades de las personas para la gestión y el desarrollo de los procesos LC en una organización de construcción. Al reconocer estas capacidades en las personas,

la organización puede promover, desarrollar, motivar, organizar y retener el talento necesario para mejorar continuamente y sostener los procesos relacionados con LC (Castka, Bamber y Sharp, 2004; Cruz y Santos, 2015; Curtis *et ál.*, 2009; Pavez y Alarcón, 2006, 2007, 2012; Sarhan y Fox, 2012, 2013b; Tortorella y Fogliatto, 2013, 2014; Salvatierra, Alarcón, López y Velásquez, 2015).

RELACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE INVESTIGACIÓN UTILIZADAS EN EL DESARROLLO DE INICIATIVAS DE EVALUACIÓN DE LC

En todos los casos, la metodología de investigación que se desarrolló es cualitativa. Se hizo uso principalmente del conocimiento de expertos. Se destacan las entrevistas para recolección de información tanto para la construcción del instrumento como para su aplicación. También se utilizaron las encuestas como instrumentos complementarios para recolección de información. La actividad más relevante fue el grupo focal, del cual se obtuvo información más precisa, pues involucra el criterio experto sobre las preguntas, por lo general abiertas, con que se aborda esta actividad. Los expertos fueron consultados tanto para obtener información relevante para el desarrollo del modelo como para la validación (Nesensohn, 2014).

Identificar en la literatura la existencia de iniciativas estándar para dirigir la evolución de la madurez de LC a través de niveles de madurez

En el marco de esta revisión, no se halló información referente a herramientas específicas para la evolución de la madurez de la implementación de LC en general, ni con referencia a la GPC, ni en las otras temáticas clasificadas.

Implicaciones de la investigación

No se identificaron modelos de evaluación de la madurez de LC con enfoque específico en la GPC. No se evidenciaron iniciativas de evaluación que consideren las fases de ejecución del proyecto de manera conjunta. Esto confirmó la existencia de una brecha en el conocimiento relacionada con la formulación de una herramienta de evaluación de LC en la GPC.

Los artículos abordan marcos conceptuales que apoyan el desarrollo de las iniciativas de evaluación en forma resumida. Las tesis desarrollan en mayor profundidad conceptos y teorías relacionadas con el tema y no se identificaron aportes teóricos relevantes al tema de evaluación de LC. Se identificaron diversos modelos de madurez que podrían ser adaptados para su aplicación a LC, modelos desarrollados para construcción, así como tam-

bién modelos de otros dominios tales como el CMMI, LCMM, Spice, Prince, EFQM, entre otros que son estudiados en el desarrollo de esta investigación. No hay una manera estándar para establecer los lineamientos comunes que deben ser incluidos en el desarrollo de un modelo de madurez de LC.

También conviene decidir si se adaptan modelos de madurez existentes o se desarrollan nuevos modelos según el interés de evaluación. De igual manera, conviene hacerlo con el proceso de validación para hallar el más conveniente para una herramienta de evaluación de LC. Ya en la práctica, la aplicación de una herramienta de evaluación debe conducir las acciones que permitan avanzar de un nivel de madurez a otro con un impacto destacado en el desempeño del proceso de producción resultado de esta madurez. Evaluaciones y acciones que deben ser entendidas y gestionadas por las personas en el sistema de producción y que no debería ser una tarea de consultores por medio de auditorías. LC por sí misma invita a la participación de los equipos de trabajo en esta tarea; las auditorías solo deberían ser consideradas como una acción de verificación y no como la acción principal de evaluación.

La aplicación del modelo de evolución podría ser vista como una herramienta de *benchmarking*, que permite compartir la información como una estrategia colaborativa dentro de la misma organización, así como del sector hacia el establecimiento de más altos estándares de desempeño.

LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

RESUMEN

Las organizaciones de construcción desarrollan su actividad comercial a través de proyectos de construcción y es la GPC el proceso más relevante en ellas. En las dos últimas décadas, algunas compañías constructoras alrededor del mundo han venido integrando LC en la GPC en virtud de los beneficios que ofrece en la búsqueda de una mayor eficiencia. De igual manera, cada vez hay más interés, por parte de estas organizaciones, en conocer el alcance de la madurez de LC con el fin de proponer, a partir de esta evaluación, acciones para lograr mejoras del sistema de producción para ser más eficientes. En esta vía, es importante comenzar por entender aspectos relacionados con la implementación y la madurez de LC en la GPC para conducir el uso del SLC-EModel como herramienta de evaluación y evolución hacia niveles superiores de madurez. Estos conceptos se despliegan en este capítulo en cumplimiento del primer objetivo de la investigación. Más adelante, en los capítulos 4 y 5, se presenta el modelo de evolución con lo cual se satisfacen el segundo y tercer objetivos.

Este capítulo se ha desarrollado sistematizando el conocimiento obtenido de los expertos consultados en el desarrollo de la investigación realizada. Las consultas han sido desarrolladas en cuatro momentos; tres entrevistas y una encuesta. En la información relacionada con estas consultas se presenta la caracterización de los participantes en cada consulta.

Con estas consultas, se recolectó información con la que fue posible construir los conceptos relacionados con la madurez de LC con enfoque en

la GPC y que contribuyen a identificar los elementos relacionados con la madurez de LC, como se verá más adelante.

IMPLEMENTACIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

La industria de la construcción, una de las más importantes para el desarrollo de un país, merece atención para ser cada vez más eficiente. Es una industria muy fragmentada, poco estructurada, con prácticas constructivas artesanales; además, la formación de sus profesionales está más orientada a las técnicas de construcción y menos al desarrollo de un modelo de gestión. Esta industria se percibe atrasada con relación a otras como la manufactura; por ejemplo, con la industria automovilística, que está a la vanguardia en el uso de la tecnología para el desarrollo de sistemas de gestión y, particularmente, en la implementación de prácticas Lean, y en la gestión de su cadena de suministro. Muchas industrias han migrado de la producción artesanal a la producción en masa y, más tarde, a la producción Lean; han entendido que Lean es una alternativa de mejora del desempeño de la producción. Actualmente, se está presentando migración hacia la llamada industria 4.0⁹, la industria digital, la globalización; una migración hacia las nuevas tecnologías que se mezclan con Lean para trabajar de manera complementaria.

La industria de la construcción también cuenta con experiencias en industrialización; sin embargo, no es una industria que pase por la producción en masa, pues la construcción realiza procesos *ad hoc* para el desarrollo del proyecto, especialmente en el sitio de obra. En manufactura, el producto pasa por diferentes estaciones de trabajo hasta que es terminado; en construcción, el producto se va elaborando en cada una de las fases del proyecto (en la fase de construcción, las unidades de producción pasan a través del producto).

La baja productividad en la industria de la construcción en comparación con otras industrias, la falta de transparencia, la deficiencia en coordinación y comunicación entre los actores involucrados, la dificultad de entregar la calidad requerida, los errores de elaboración de las diferentes fases del proyecto, la falta de una correcta distribución de información, la inseguridad en el sitio de trabajo, la corrupción, entre otros, son algunos de los problemas

⁹ De acuerdo con Crespo (2017): La industria 4.0 se refiere a la digitalización de las cadenas de valor. Eso se logra al integrar datos, *software* inteligente y sensores en toda la cadena de suministro lo que permite planificar y controlar la producción de manera inteligente.

que pueden ser resueltos o asistidos de manera más favorable y exitosa a través de la implementación de LC (Bashir, Suresh, Proverbs y Gameson, 2010). El producto de la implementación de Lean se muestra en procesos de producción más eficientes y eficaces (Alarcón *et ál.*, 2005), con lo cual las organizaciones de construcción pueden establecer una oferta de valor que se diferencia de la competencia (Almeida y Salazar, 2003). De las entrevistas con expertos se presenta la sistematización de ese conocimiento, el cual se agrupa en cuatro temáticas que se presentan a continuación.

Componentes del sistema de producción de proyectos de construcción

La producción de proyectos de construcción requiere de la participación de personas capacitadas, con actitud y disposición hacia el trabajo y la organización, poniendo a disposición del proyecto sus procesos organizativos en los niveles directivos, tácticos y operativos.

La implementación de LC va desarrollándose sistemáticamente en la medida en que se avanza en mejoras del sistema de producción, y este va logrando un mejor desempeño, va madurando. Es una simbiosis: el sistema mejora con la implementación de LC y la implementación de LC va teniendo un mayor alcance. Esta implementación presenta situaciones que se oponen a su buen desempeño, de tal manera que estudiar las barreras y los factores críticos de éxito (FCE) permite construir el entendimiento de su impacto en la implementación de LC.

En estudios previos (Cano, Delgado, Botero y Rubiano, 2015a, 2015b; Mano *et ál.*, 2018) se examinan artículos académicos —publicados entre 1998 y 2018— con base en experiencias de la implementación de LC alrededor del mundo, para identificar barreras y FCE, los cuales se clasificaron en tres componentes que sirvieron de base para la definición de las categorías del SLC-EModel. Estos componentes se definieron luego de entender el sistema de producción como una serie de elementos organizados que interactúan entre ellos y los conecta con los clientes y el ambiente externo. Este sistema incluye personas, máquinas, procesos, subprocesos, procedimientos, flujo de información, materiales y la gestión misma. Todos estos elementos hacen que los insumos sean transformados en un producto o servicio (Carro y González, 2012). Estos componentes son:

- **Las personas** que forman parte de la organización y que soportan los procesos de producción del proyecto y el sistema de producción mismo. Corresponde a la participación de las personas en todas las actividades de producción tanto en la organización como en el sitio de producción. La participación de las personas es un aspecto determinante para el desarrollo de las actividades productivas. Es con base en

ellas que se sustenta el sistema de producción y, en la medida en que las personas se involucran, se alcanzan los objetivos operacionales y, por consiguiente, los objetivos empresariales.

- ***El sistema de producción***, por medio del cual se elabora el producto. Las funciones de producción se llevan a cabo en el sitio mismo de la transformación de los insumos en producto. “Cada acción de transformación que da lugar a cambios en los insumos se denomina una operación y la secuencia de operaciones requerida para completar un ciclo determinado de transformaciones es llamada proceso. Por ello se habla de proceso de transformación” (Carro y González, 2012, p. 3).
- ***El soporte de la organización*** con cuyos procesos empresariales se apoyan los procesos de producción del proyecto de construcción. Son aquellos procesos y funciones empresariales, tanto internos como externos, que no son operaciones de producción propiamente dichas, sin las cuales la producción no se puede llevar a cabo.

Implementar Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con los expertos entrevistados, lo primero y más importante al pensar en la implementación de LC es contar con la claridad de los beneficios y los resultados que se pretenden alcanzar con esta. Las empresas implementan LC por distintas razones. Por ejemplo, hay empresas que empezaron a implementar conceptos Lean para lograr una mejor relación con el cliente, convertirse en una empresa “industrial avanzada”, ser más competitivas en términos de gestión y prevención de riesgos laborales, reducir y acabar con reclamos de los clientes. Otras empresas implementan LC porque otras lo están haciendo, y su objetivo es ser mejor que su competencia.

Los expertos se refieren a diferentes maneras de avanzar en un proceso de implementación y reconocen que son diversas las estrategias para este fin; lo que evidencia que no hay consenso respecto de una ruta de implementación de LC. Algunos sugieren iniciar por la organización y luego pasar al proyecto, en tanto otros recomiendan comenzar por el proyecto. Por otro lado, para algunos implementadores es importante iniciar por el diseño, para otros por la producción, el cliente o por los proveedores. En ciertas empresas, se empieza de una forma más interna, en otras de una forma más externa con la relación con el cliente, en otras por la innovación en el producto o el servicio. Los expertos refieren que es común que las implementaciones de LC se inicien en una línea de producción, una planta, una obra, un equipo de diseño, un proceso o proyecto piloto, y después se amplía a otros procesos de la organización. El proceso de transformación es largo,

no se convence a las personas por mucho tiempo con palabras, las personas deben ver los beneficios rápido, beneficios para cada uno y, en este sentido, se establecen compromisos, cambios de actitud y mucha más motivación. Ese beneficio debe ser percibido por cada persona en el proceso. Entonces, surge un cuestionamiento al respecto: ¿hay un camino a seguir para realizar la implementación de LC que las empresas no dimensionan?

El beneficio principal de la implementación de LC es la mejora el desempeño del negocio; sin embargo, las organizaciones de construcción presentan sistemáticamente dificultades para realizar la implementación de LC. Estas dificultades se han venido sistematizando en la identificación de las barreras que se oponen a su implementación (Cano y Rivera, 2015; Mano *et ál.*, 2018), así como los FCE que contribuyen a garantizar el éxito de dicha implementación y que pueden ser usados para contrarrestar el efecto de las barreras. Es importante realizar esta identificación, caracterización y categorización para trazar una estrategia que, en conjunto con la ruta de implementación, un plan de mitigación y eliminación de barreras, aporten al éxito de la implementación.

En el corto plazo, los beneficios de la implementación de LC corresponden con la reducción de desperdicios, la mejora de la productividad, la rentabilidad, el mejoramiento del flujo de trabajo y el aumento de valor, la satisfacción de los interesados; se evidencian periodos de construcción más cortos, reducción de mano de obra, aumento de la flexibilidad del sistema, mayor calidad y mejor seguridad y salud (Jørgensen, 2006; Mossman, 2009; Thomas, Horman, Minchin y Chen, 2003).

En el largo plazo, los beneficios tienen que ver con la retención de personal, la construcción de un mejor ambiente de trabajo, la disposición de proyectos más seguros para las personas, el logro de un mayor control del proyecto, mayor flexibilidad, el desarrollo de una cultura en torno al mejoramiento continuo, una cultura que habla el mismo idioma, entre otros aspectos. Y de esta manera, responder mejor a próximos proyectos, a nuevas solicitudes y adaptarse a cambios y solicitudes cambiantes de los clientes.

Como se evidencia con la investigación realizada, la implementación de LC en la GPC debería seguir sistemáticamente una “ruta” que incluya los elementos que la hacen más eficiente. Se propone que esta ruta vaya siendo definida con ayuda del SCL-EModel, y de acuerdo con las condiciones de la organización, según el esquema general mostrado en la Figura 3.1. Es importante aclarar que la ruta de implementación no es única, pues todas las organizaciones no se encuentran en las mismas condiciones ni desarrollan la GPC de la misma forma; así, para cada organización podría identificarse una ruta crítica de implementación.

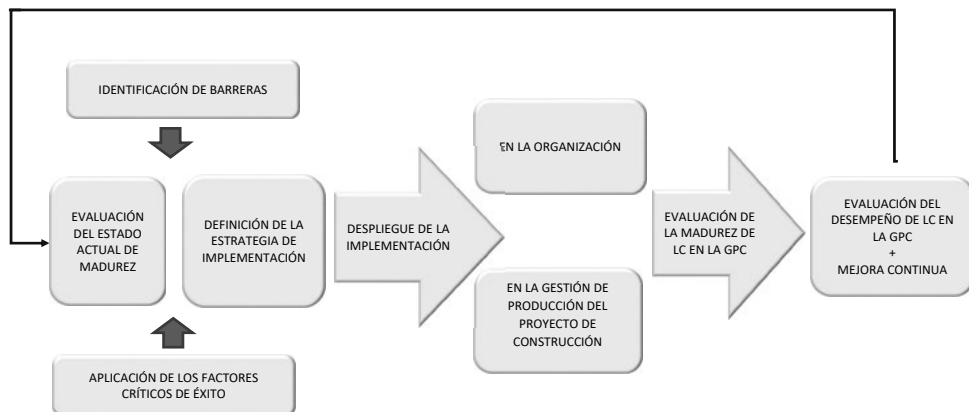


Figura 3.1. Proceso propuesto de implementación de LC.

Fuente: elaboración propia.

Para conducir una adecuada estrategia de implementación y evaluación para la mejora continua, se deben identificar los atributos relacionados con la madurez de LC, los mismos que son objeto de implementación de LC. Esta identificación implica establecer cómo se encuentran relacionados los atributos, la forma en que se asocian para conformar factores de madurez, su importancia en el alcance de la madurez de LC en la GPC y cómo ellos avanzan en su madurez individual. La intervención de LC en estos atributos permitirá disponer de un sistema de producción LC desarrollado de acuerdo con las condiciones particulares de la organización que implementa LC, en la búsqueda de mejorar la eficiencia de la producción de proyectos de construcción.

En los últimos años, se ha venido demostrando que con la implementación de LC se pueden mejorar los resultados del proyecto de construcción y, por consiguiente, de la organización (Aziz y Hafez, 2013). Los proyectos de construcción son complejos y no se garantiza el logro de los objetivos con la motivación individual de las personas; se requiere la aplicación de principios y herramientas que ayuden a trabajar colectivamente, a disciplinar el trabajo, entender y resolver los problemas de manera sistémica y comprender el desempeño del proyecto en su interacción con el medio, entre otros aspectos. LC y sus herramientas contribuyen a gestionar esta complejidad y ayudan a producir mejoras sistémicas en la productividad de las personas de manera individual y como equipo. Con una adecuada implementación de LC en la GPC, se espera una mayor consistencia en el desempeño del sistema de producción. La consecuencia de la consistencia es mejor calidad, que la gente sepa lo que tiene que hacer y lo haga bien, que la gente trabaje con gusto, que el entorno de trabajo sea seguro y productivo, que se cree la disciplina que permita mantener las costumbres y las acciones de mejoramiento continuo.

Diferencias en la implementación de Lean en la organización y en el proyecto de construcción

Una organización de construcción está al nivel de corporación y el proyecto materializa su producto. Se presentan importantes diferencias entre implementar LC en la organización de construcción y en el proyecto. Las formas de gestión en cada instancia son diferentes; la organización cuenta con una alta capacidad para gestionar los procesos de soporte al proyecto de construcción. En la organización es más aplicable el pensamiento Lean o administración estilo Lean; la diferencia está en el producto, el cual hace particular la gestión de producción del proyecto. De acuerdo con los expertos consultados, LC tiene cada vez más sentido en el ámbito de los proyectos de construcción, cuenta con principios y tecnologías eficientemente adaptadas para la construcción.

Al comenzar la implementación de LC, la organización debe tener claridad sobre los objetivos que se persiguen para el proyecto. Es importante, entonces, la alineación y sincronización de la organización con el proyecto. La implementación se enfoca en capacitar, en lograr una cultura a largo plazo, no se piensa en herramientas específicas, estas pueden cambiar, podría ser LPS u otra después; lo que no va a cambiar es el sustento basado en los principios, los conceptos asociados a la eliminación de pérdidas, el mejoramiento del flujo y la creación de valor.

En la organización, se parte de implementar herramientas, como el Value Stream Mapping (VSM, por su sigla en inglés), entender principios como un todo e implementar mejoramiento continuo para involucrar distintas áreas de manera más rápida. Cuando se implementa Lean a nivel organizacional, se desarrolla una estructura que soporta la implementación en el proyecto. Esto va asociado a comportamientos esperados; la organización proporciona los estándares, las comunicaciones son formales y se empodera a las personas que van a liderar estas iniciativas. Si no se cuenta con una organización que integre las fases del proyecto, considerando que lo que sucede en el proyecto es en cierta forma un “clon” de la mentalidad de la organización, se verá comprometido el desempeño de la implementación en el proyecto.

Una premisa para la implementación de LC es que se cuente con un concepto integrado de las fases del proyecto. La implementación de LC en el proyecto busca obtener beneficios rápidamente. Esto se logra implementando herramientas como LPS o 5S, las cuales se pueden desarrollar de manera independiente del proceso de implementación, si las personas aun no tienen convencimiento de los beneficios de LC para el proyecto y la organización. A las personas, primero se les entrena en una disciplina, y con los resultados

se genera convencimiento; de ahí en adelante se desarrolla el conocimiento para trabajar con las herramientas. La alta rotación del personal es un elemento que tiene un impacto negativo en el proceso de implementación de LC, especialmente en el proyecto más que en la organización; sin embargo, es un elemento al que la organización debe prestar mucha atención, debe estar conectado con la estrategia que apoya permanentemente la implementación de Lean en la organización, y buscar que la aplicación sea sustentable en el tiempo a pesar de que las personas roten. En este sentido, si el quehacer de la organización son los proyectos de construcción, es la gestión del proyecto la que madura.

La implementación de Lean cuenta con dos caminos que deberían usarse en la medida en que se genere convencimiento y conocimiento al interior de la empresa, para más adelante entender y trabajar mejor en los proyectos con sus herramientas. En la empresa no se atiende el resultado específico como en los proyectos; se enfoca en la estrategia, el comportamiento de indicadores, se evalúa el objetivo y el mensaje que se está enviando al proyecto. En cuanto al proyecto, lo importante es cumplir la oferta de valor.

¿Cómo debe ser una implementación efectiva de Lean en la gestión de producción de proyectos de construcción?

El objetivo de LC es mejorar el flujo de producción de los proyectos, eliminando sistemáticamente las actividades que no agregan valor y maximizar el valor de entrega al cliente (Pons, 2014); asimismo, propone cambiar el sistema tradicional a un sistema innovador diferente (Ayarkwa, Agyekum, Adinyira y Osei-Asibey, 2011). La decisión de realizar un proceso de implementación de LC debe convocar la participación de todas las personas en el sistema y es la gerencia la impulsora del cambio. Desafortunadamente, no es suficiente que se realicen actividades voluntarias; las personas necesitan tiempo para pensar y actuar en todos los aspectos de la implementación y también para aprender de los errores. En este proceso, la medición es importante para establecer parámetros de comparación de las mejoras. LC es un proceso de mejoramiento continuo, cuyo objetivo es construir una cultura de mejora continua para garantizar su sostenibilidad (Salvatierra *et al.*, 2015).

Lean en construcción crea una nueva forma de gestión de producción de proyectos. Esto se logra a través de la materialización de los principios. Esta forma de gestión se diferencia de la gestión tradicional en que permite definir claramente tanto los objetivos como la estructura de fases en que se desarrolla el proyecto, lo cual mejora la relación entre ellas y la participación de las personas (Ballard y Howell, 2003). La implementación de LC

no debe estar restringida al uso de herramientas (Koskela y Ballard, 2012); se trata de cambiar la forma de gestionar el proyecto y, con esto, cambiar la estructura de la empresa. Esta tarea requiere de personas con habilidades para resolver problemas de manera ingeniosa y que conformen equipos de trabajo comprometidos. Aunque por lo general la implementación de LC inicia con herramientas, rápidamente se entiende que es indispensable un cambio de pensamiento y gestión (Aziz y Hafez, 2013).

De otra parte, la gestión de cambio es la responsable de mantener equipos motivados, formados y comprometidos. Se debe contar con líderes convencidos de los beneficios de vivir la filosofía, con un profundo conocimiento de sus principios, la importancia de las personas y un eficiente uso de las herramientas. En sus comienzos, se han implementado herramientas LC con más énfasis en obra; sin embargo, la experiencia va demostrando la importancia de ampliar esta implementación a todo el ciclo del proyecto. Así se exige de la organización el servicio de cada uno de los procesos que apoyan la gestión. Con la implementación de LC en el proyecto, y especialmente en la obra, se revelan los problemas no resueltos en la organización y las áreas de soporte del proyecto. Se trata de un ciclo de realimentación que conduce al aprendizaje organizacional y al mejoramiento continuo del desempeño del proyecto.

Entre las dificultades que aparecen en las organizaciones de construcción para abordar procesos de implementación de LC está la poca comunicación entre las áreas. Estas áreas presentan bajo nivel de relacionamiento entre ellas, lo que compromete el desempeño del proyecto al no sincronizar efectivamente sus procesos. Así, todas las áreas de la organización deben mapear sus procesos e identificar detalladamente su flujo de valor, sus proveedores y clientes, además de la manera como se sincronizan eficiente y efectivamente con el proyecto, “no sería coherente contar con implementaciones parciales, un área de la empresa con cierto orden y el resto viviendo en un caos” (Gaete, 2016).

Los proyectos se realizan con el apoyo de áreas de la organización como tecnología de información y recursos humanos, entre otras, y su aporte al desempeño del proyecto hace necesario que los procesos en dichas áreas de la organización adquieran una gestión Lean. Una mejor gestión se refleja en la alineación de la organización con el proyecto, y viceversa, lo cual se evidencia en que los indicadores de desempeño muestran que se está cambiando, no basta con que la obra esté muy limpia, muy organizada, que se lleve a cabo la reunión de planificación semanal y que el personal esté uniformado, sino se cumple con los plazos, ni con el presupuesto y se entrega un producto de dudosa calidad (Gaete, 2016).

Hay que ir más allá, es conveniente preguntarse si la implementación ha servido para algo, o si el clima que se está creando con las personas está representando resultados en el desempeño del proyecto. Si las respuestas son negativas, el ejercicio no funciona y la implementación de LC no tiene impacto.

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones para realizar un proceso de implementación, las cuales se obtuvieron de los expertos consultados en la investigación realizada. Luego de estas recomendaciones, se presentan unas más precisas para las categorías definidas en el estudio.

Recomendaciones generales

- Mantener al equipo motivado y centrado en el cliente.
- Organizar el proyecto en torno a cadenas de valor y mapearlas continuamente.
- Fomentar continuamente el liderazgo y mantener motivado al equipo del proyecto.
- Fomentar en el equipo de trabajo el respeto y la confianza en las personas.
- Mantener planes de entrenamiento continuo del equipo del proyecto en los diferentes niveles jerárquicos y fases del proyecto.
- Utilizar progresivamente herramientas y rápidamente desarrollar un cambio de pensamiento y gestión.
- Propiciar la solución de problemas con uso constante de Kaizen.
- Desarrollar procesos de aprendizaje a largo plazo.
- Desarrollar líderes y un sistema de sucesión.
- Alinear las metas desde la perspectiva de la cadena de valor.
- Utilizar sistema de medición de indicadores de proceso y con base en él tomar decisiones.
- Visibilidad de resultados y desarrollar canales de comunicación y retroalimentación para todos en el proyecto.
- La implementación de LC debe ser una obligación para todos los miembros del proyecto con el compromiso de la alta dirección.
- Referenciación permanente, tanto interna como externa.
- Promover el mejoramiento continuo.

Sobre las personas

- La cultura se manifiesta en la experiencia de la compañía en el hacer. El hacer provoca en las personas cambios en su forma de ejecutar las cosas; de esta manera se construye una línea base para que las personas se inicien en la filosofía a partir de la cual avanzar. Sin embargo,

no es conveniente llenarlas de conceptos. Teorizar y después aplicar no es una buena estrategia, no se sostiene en el tiempo, pues las personas vuelven a hacer lo que han hecho por mucho tiempo.

- El aprendizaje debe realizarse entre la práctica y la teoría, pero desarrollar la teoría desde la práctica. Esta ha sido la forma más eficiente en que se ha introducido LC y se va desarrollando la cultura.
- La implementación parte de eliminar los desperdicios en los procesos y es aquí donde se ven los resultados más impactantes. Después de esto hay que sostener el cambio, lo que marca el éxito de la implementación que se refleja en resultados.
- Desarrollar una cultura de mejora continua, entender el problema e identificar soluciones en conjunto, avanzar en capacitaciones, realizar talleres y seguir haciendo el ejercicio por largo tiempo.
- En el corto plazo hay que enseñar en el hacer; en el mediano plazo se debe sostener generando una concepción de aprendizaje que siempre debe mejorar.
- Se debe promover que las personas realicen procesos de innovación. Para innovar se debe contar con capacidades que permitan identificar cómo mejorar las condiciones de trabajo, las condiciones asociadas con los interesados del proyecto desde el punto de vista de la red de trabajo. Esto implica involucrar tecnología para ser más eficientes.
- Permitir a las personas adquirir habilidades para el desempeño de la implementación creando equipos de personas que la apoyen en todos los niveles de la organización. Esto permite desarrollar de manera sostenida el concepto de mejora continua, a pesar de las dinámicas de las organizaciones en las cuales las personas que recién llegan a los procesos no cuentan con la cultura LC. Se incentiva a que en la organización haya personas que vayan escalando en la filosofía, que la organización desarrolle procesos continuos de formación certificando a las personas en Lean. Esto genera aprendizaje sin romper la cadena de trabajo, lo que implica un proceso de cambio organizacional.
- Avanzar en los niveles de formación, de esta manera cada persona genera un proceso de interacción más amplio en términos de la mejora continua entre más participantes del proyecto, para desarrollar así habilidades para incorporar más elementos de manera sistemática para el mejor desempeño de la implementación y del proceso.
- Enfatizar en el desarrollo de conocimientos y capacidades de las personas, más que en el proceso mismo. El desarrollo de las capacidades de las personas se realiza a partir del proceso en el cual estén invo-

lucradas. El proceso es importante por el aprendizaje que logren las personas y, desde este punto, se gestiona la mejora del proceso.

Sobre el sistema de producción

- Antes de realizar una evaluación de prácticas, se debe contar con un plan de implementación y definir los parámetros del cambio esperado con las prácticas.
- Definir cómo es el proceso de implementación y qué tan importante es el cambio que se producirá con la implementación de esas prácticas para el proyecto.
- Contar con una frecuencia de evaluación por parte del responsable del proyecto, pues así tiene el criterio para asignar la calificación. Evaluar y usar la evaluación para mejorar es muy importante.
- Conectar los principios y las prácticas. Definir claramente cómo un principio y una práctica se complementan, y precisar la interdependencia entre ellos.
- Identificar los factores claves del desempeño de LC y las relaciones entre ellos. Debe haber un número mínimo de factores para conseguir prácticas Lean más sistémicas.
- Asegurar los flujos en el proceso; esto se da en función de la gestión de las personas, de la gestión del cambio. Asegurar el flujo implica todo, personas, procesos y herramientas. Contar con procesos controlados, desarrollar en las personas actitudes y comportamientos que impactan los procesos de producción y de gestión, la estandarización, la mejora continua, los mejores sistemas de producción desarrollados a partir de las consideraciones de valor, la eliminación de pérdidas y el mejoramiento del sistema para garantizar flujos continuos y crear una cultura de hacer las cosas de forma ordenada.
- Establecer un sistema de indicadores de proceso que permitan el control y buscar continuamente la mejora de estos indicadores.
- Realizar la implementación del sistema de producción, verificar que se inicie el uso en el sistema, entender qué usar, cuándo usarlo, configurar las herramientas y establecer rutinas. Esto se lleva a cabo con un equipo interno de líderes que apoya y ayuda a corregir y alinear la implementación, así como a verificar el nivel del uso de LC.

Sobre el soporte organizacional

- La alta dirección debe destinar tiempo en su agenda de trabajo diario para llevar a cabo acciones de liderazgo visibles, en las que se ejecuten las iniciativas de mejoramiento continuo. Estas acciones deben

alcanzar resultados que estén establecidos como objetivos y realizar seguimiento a los indicadores que de manera indirecta miden el desempeño general.

- La alta dirección debe estar convencida de los beneficios que puede obtener de la implementación y entender que estos beneficios se logran en el largo plazo, a pesar de que algunos se alcancen en el corto plazo. Debe contar con un alto conocimiento y entendimiento de LC, no solo convencerse y apoyar la implementación, sino también profundizar en el conocimiento para hacer frente a los retos que se presentan, porque la construcción todavía no es un *commodity*¹⁰, a pesar de que los clientes creen que lo es. En la construcción, un proyecto mal gestionado puede quebrar una empresa; es un negocio de alto nivel de riesgo, a diferencia de otras industrias.
- Ante situaciones difíciles, que lleguen a comprometer la estabilidad de la implementación, es preciso entender que cada proyecto es único y el riesgo es intrínseco al mismo. No dudar si el camino es el correcto por no haber alcanzado aún un alto nivel de conocimiento. Se necesita disciplina y esta es el resultado de la claridad y la motivación.

Mejoramiento del sistema de producción de proyectos de construcción con la implementación de LC

- El proceso de obtención, transmisión e intercambio de información debe ser claro y eficiente. La información ayuda a entender las causas de las desviaciones respecto del plan lo más pronto posible y ayuda a planificar el avance del proyecto de acuerdo con lo que se debe y puede hacer.
- El sistema de producción y la producción del proyecto mejoran en la medida en que la información obtenida contribuye a tomar mejores decisiones.
- Enfatizar en la gestión al nivel táctico, de manera que se remuevan eficientemente las restricciones; esto significa lograr la coordinación multidisciplinaria necesaria para el proyecto.
- Es inconsistente decir que la implementación de LC está madurando y observar que el proceso de producción no mejora. De ahí que los expertos que han formado parte de la investigación realizada coinciden en que es muy importante que LC alcance altos niveles de madurez en su proceso de implementación en la GPC.

¹⁰ Los *commodities* son bienes genéricos, es decir, no se percibe una diferenciación entre ellos.

- Uno de los aspectos que muestran la madurez de la implementación de LC corresponde con los resultados observables de mejoramiento. Es conveniente definir cuáles son los resultados que se espera obtener con la implementación de LC. Un ejemplo en manufactura es, según Rivera (2016):

Florida Power & Light, una empresa estadounidense que genera y distribuye energía en la Florida ganó el premio Deming de la calidad en Japón en 1989 (Gitlow y Loredó, 1992). Esta fue la primera empresa extranjera en obtenerlo, sin embargo, cuatro años más tarde quebró. Este ejemplo muestra que la forma en que implementaron y evaluaron el sistema de calidad era incompleta y no reflejaba la realidad de la empresa. Solo se valoró qué tan bien se implementaba el sistema de calidad y de mejoramiento continuo. Perdían clientes y experimentaban incremento de pérdidas de energía en la transmisión. Para la obtención del premio, lo que fue calificado fue qué tan “maduro” estaba su sistema de calidad, sin embargo, el concepto de madurez que usaron no incluía el concepto de obtención y sostenimiento de resultados positivos para la empresa.

Con base en el ejemplo anterior, se puede asegurar que un proceso de implementación de un sistema de producción como LC no sirve de nada si las empresas constructoras no logran mejorar la salud general, la productividad, sus ingresos, su rentabilidad y reducir los costos de producción. El beneficio principal de la implementación de LC es la mejora del desempeño del negocio. Los beneficios de rápido impacto y alta visibilidad de la implementación de LC corresponden con la reducción de pérdidas, la mejora de la productividad, la rentabilidad, el mejoramiento del flujo, el aumento de valor y la satisfacción de los interesados. Se evidencian periodos de construcción más cortos y reducción de mano de obra.

Para conducir una adecuada estrategia de implementación y evaluación para la mejora continua, se deben identificar tanto los elementos relacionados con la madurez de LC como las relaciones entre ellos para entender cómo se alcanza la madurez de LC en la GPC, identificación que se presenta en el siguiente capítulo.

LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Alcanzar la madurez, en términos generales, es un proceso que lleva mucho tiempo y hay diferentes elementos que contribuyen a esta madurez y que se relacionan entre ellos de manera sistémica. Para avanzar en la consecución de un proceso maduro, primero se debe estabilizar el sistema. Esta estabilidad se relaciona con la reducción de la variabilidad en los procesos, en los suministros y en la forma de realizar el trabajo. Cuando se empieza la implementación de LC, no se sabe cómo lograr la estabilidad; por lo tanto, es importante conocer dónde se está en ese momento. En esta sección se presentan conceptos relacionados con la madurez de LC en la GPC que conforman una base teórica para abordar el desarrollo del SLC-EModel y el SLC-MM. Estos conceptos se consolidan a partir de consultar a expertos en LC y se sustentan con las referencias académicas estudiadas (Cano *et ál.*, 2017).

En la identificación de la madurez de LC, hasta ahora solo se dispone de un modelo de madurez, el Lean Construction Maturity Model (LCMM) desarrollado por Claus Nesensohn en su tesis de doctorado en 2014. Este modelo se enfoca en evaluar la madurez de la organización, en la que el proceso de producción es un factor de evaluación. El modelo ha pasado por diversas etapas de validación que aseguran su utilidad para la evaluación de LC; en este caso, la organización puede establecer el impacto del uso al orientar el avance de LC, por lo cual se requiere de varios ciclos de evaluación para concluir sobre esta madurez.

De otra parte, el SLC-EModel ha sido desarrollado para evaluar la madurez de la gestión de producción de proyectos de construcción al integrar LC. En este modelo, la organización forma parte de él, con la participación de los procesos que contribuyen a la producción del proyecto. Este modelo es un artefacto que evalúa, en primera instancia, el nivel de madurez de LC al medir las consecuencias de su implementación en el sistema de producción, y, en segunda instancia, propone acciones para alcanzar el siguiente nivel de madurez.

El concepto de madurez

En su tesis de doctorado, Nesensohn (2014) presenta el concepto de madurez en el contexto organizacional y de proyectos, luego de referir diversas definiciones estudiadas. Sintetiza que la madurez es un concepto que se utiliza en diferentes contextos de gestión, entre estos, la madurez de la organización, la madurez de la gestión del proyecto y la madurez del proceso. Andersen y Jessen (2003) señalan que la madurez de la gestión del

proyecto es la capacidad de la organización para manejar diferentes tipos de proyectos de forma eficaz y eficiente, mientras se logran los objetivos del proyecto; es “un estado donde la organización está en perfectas condiciones para lograr sus objetivos” (p. 457). De acuerdo con lo anterior, se hace importante diferenciar entre la gestión de la organización y la gestión del proyecto. En términos de la evaluación de madurez, autores como McCormack y Lockamy (2004) precisan que “el concepto de madurez es un proceso que tiene un ciclo de vida que se evalúa en la medida en que el proceso se define, gestiona, mide y controla explícitamente” (p. 1).

En organizaciones de construcción, la GPC es el principal proceso que se lleva a cabo. La producción del proyecto requiere de las personas, del sistema de producción y de los diferentes procesos de la gestión organizacional al servicio del proyecto. Entonces, tiene sentido precisar que la madurez de la GPC se alcanza de manera independiente a la madurez de la organización. A falta de una definición para la madurez de LC en el contexto de la GPC y el uso de LC, la investigadora plantea que en la definición de madurez de procesos deberían considerarse conceptos tales como la capacidad de desarrollar, evaluar, sostener y mejorar continuamente un estándar para un proceso.

Definición de la madurez

Es aquel estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. Es un estado que se va alcanzado paulatinamente al transitar por diferentes niveles de madurez, que permiten escalar hacia un estándar máximo, un nivel de excelencia de referencia para el contexto, un “Gold Standard” (Cano y Rivera, 2015).

Evaluar la madurez

La madurez se evalúa con ayuda de herramientas desarrolladas para el campo específico. Estas herramientas son modelos que contienen un conjunto de procesos organizados en niveles de madurez que se alcanzan de manera progresiva. De acuerdo con Ibbs y Kwak (2000), la utilidad de los modelos de madurez en el campo de la gestión de proyectos es propiciar un mejor desempeño de los proyectos; es así que “la madurez de PM es un nivel bien definido de sofisticación que evalúa las prácticas y los procesos actuales de gestión de proyectos de una organización” (p. 1) y ofrece rutas de mejora para estos procesos. El modelo de madurez permite disponer de información comparativa que puede ser usada para trazar un plan de desarrollo organizacional e identificar las fortalezas y debilidades de la organización con respecto a sus áreas de proceso (Ramírez, 2009). Existe una amplia variedad de modelos de madurez en diferentes sectores; el más conocido es

el Capability Maturity Model Integration (CMMI, por su sigla en inglés), el cual ha sido tomado como referencia para el desarrollo de algunos modelos de madurez como el Spice (Ehsan, Perwaiz, Arif, Mirza y Ishaque, 2010).

Los modelos de madurez (MM) son referentes prácticos que ayudan a las organizaciones a medir el punto en que se encuentran en el camino hacia la excelencia analizando las brechas para alcanzarla. Sirven como marco de trabajo referencial, como una herramienta de diagnóstico organizacional, convirtiéndose en instrumento de desarrollo e incentivo para el alcance del éxito y la competitividad organizacional frente a los retos de la globalización. Al aplicarlos, las organizaciones desarrollan habilidades de gestión y consolidan estructuras para la creación de valor de manera continua y sostenida por medio de procesos de mejoramiento e innovación que contribuyen a reducir la brecha de competitividad en temas como productividad y efectividad. Sirven de punto de referencia para que las organizaciones desarrollen las mejores prácticas referenciadas con el objetivo de entregar una oferta de valor claramente diferenciada, sostenible e innovadora, que asegure la productividad y la competitividad.

La madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

Lean fue propuesta en 1992 para su aplicación en construcción. Algunos de los expertos consultados en la investigación realizada coinciden en expresar que aún es muy temprano para hablar de la existencia de organizaciones de construcción maduras en LC, a pesar de que alrededor del mundo existen organizaciones de construcción con altos niveles de desempeño que están integrando LC como un sistema de gestión de la producción. De acuerdo con los expertos consultados, se pueden identificar características que muestran cómo se va manifestando la madurez de LC en la GPC en aspectos particulares que se trabajaron en la investigación y se describen en este documento.

La integración de Lean en construcción, como en otros sectores, requiere de la participación y el compromiso de la alta dirección. No solo en términos financieros, sino también endireccionamiento estratégico y disponibilidad de recursos humanos en todos los niveles jerárquicos. Este direccionamiento estratégico promueve un cambio en la cultura de la organización y en las personas de ella (Green, Harty, Elmualim, Larsen y Kao, 2008). Por consiguiente, la expectativa de mejora de la eficiencia de la producción va consolidándose, y es entonces cuando aparece el interés de conocer el estado de mejora del sistema de gestión de producción de proyectos de construcción, en otras palabras, el interés en identificar si integrar Lean a la GPC ha sido

una buena decisión. Esta identificación se realiza mediante la evaluación organizacional con el uso de MM. En este sentido, es conveniente primero conocer qué es la madurez de LC en la GPC antes de hablar de MM.

Muchas empresas de construcción están realizando una transición hacia un sistema de producción de LC como una estrategia para mejorar su productividad, eliminando problemas relacionados con el mal desempeño de los proyectos, incumplimiento de contratos, mala calidad de la construcción, sobrecostos, entre otros (Costa *et ál.*, 2015). En general, la industria de la construcción muestra poco desarrollo en el área de producción tanto en la obra como en cada una de las fases del proyecto; asimismo, presta poca atención a las actividades y a la gestión del flujo de producción (Vieira, 2006). La poca productividad en comparación con otras industrias, falta de transparencia, de coordinación y de comunicación entre los actores involucrados, la baja calidad, la generación de errores imprevistos, la falta de una correcta distribución de información, la inseguridad industrial, la corrupción, entre otros, son problemas que pueden ser abordados de manera exitosa con la implementación de LC (Bashir *et ál.*, 2010; Bashir, Suresh, Proverbs y Gameson, 2011).

Categorías de madurez

En el apartado *Componentes del sistema de producción de proyectos de construcción*, se hace referencia a los principales componentes en que está descrito el sistema de producción. Estos componentes se denominan categorías, y agrupan otros elementos de madurez que se irán explicando más adelante. En cada una de las fases del proyecto están presentes las tres categorías: (a) personas, (b) sistema de producción y (c) soporte de la organización para la producción del proyecto.

Personas

Las personas son la base del desempeño de cualquier proceso. Son las personas quienes ponen en funcionamiento el proceso de producción en cada uno de los roles que se integran al proyecto. Esta categoría contiene los elementos de madurez relacionados con las personas que están involucradas con los procesos que contribuyen al desarrollo del proyecto de construcción. Se clasifican en dos factores: (a) el trabajo en equipo, el cual integra aspectos de educación, entrenamiento y actitud para el trabajo en equipo, y (b) el liderazgo LC, que integra actitud y cultura en procesos de desarrollo LC y el desarrollo de liderazgo LC.

El hecho de que una persona sea capaz de aprender múltiples habilidades, que aprenda a estandarizar las cosas que hace en su trabajo, a proponer

mejoras a los procesos en que interviene, a ejecutar proyectos de mejoramiento y evaluar el nuevo estado para realizar un nuevo ciclo de mejoramiento, es una clara evidencia de madurez. Esto fortalece su participación en los procesos de mejoramiento continuo en todas las fases.

En términos de modelos de madurez que se enfoquen en las personas, se destaca el People Capability Maturity Model (P-CMM) desarrollado por Curtis, Hefley y Miller (2009). Este modelo se enfoca en aspectos particulares del desarrollo de las personas en la organización, toda vez que son ellas quienes llevan a cabo los procesos. En el P-CMM se sigue un proceso de evolución que va desde prácticas *ad hoc* hasta la consolidación de prácticas maduras que ayudan a incrementar de manera continua la capacidad de la fuerza laboral. Este modelo se fundamenta en diez principios que se muestran a continuación y que contribuyen específicamente en esta categoría para el desarrollo del SLC-EModel. Estos principios, traducidos del P-CMM (Curtis *et ál.*, 2001; Curtis, Hefley y Miller, 2009) son:

- En organizaciones maduras, la capacidad de fuerza de trabajo está directamente relacionada con el desempeño del negocio.
- La capacidad de la fuerza laboral es un asunto muy importante relacionado con aspectos de competitividad y una fuente de ventaja estratégica.
- La capacidad de la fuerza laboral debe ser definida en relación con los objetivos estratégicos de la organización.
- El énfasis en el desarrollo del conocimiento cambia el enfoque que permite pasar de los elementos del trabajo a las competencias de la fuerza laboral.
- La capacidad puede medirse y mejorarse en múltiples niveles de la organización, incluidos individuos, grupos de trabajo, competencias de la fuerza laboral y la organización.
- Una organización debe invertir en la mejora de la capacidad de las competencias de la fuerza laboral que son más críticas para mejorar su capacidad en función del negocio.
- La gestión operativa es responsable de la capacidad de la fuerza de trabajo.
- La mejora de la capacidad de la fuerza de trabajo puede llevarse a cabo como un proceso integrado de las prácticas y procedimientos probados.
- La organización es responsable de proporcionar oportunidades de mejora, y los individuos son responsables de tomar ventaja de ellas.
- Debido a que las tecnologías y formas de organización evolucionan rápidamente, las organizaciones deben mejorar continuamente las

prácticas de la fuerza de trabajo y desarrollar nuevas competencias para la fuerza laboral.

En la categoría de personas, se identifican dos elementos de madurez o factores de madurez (FM), los cuales agrupan los atributos responsables de la madurez en el sistema. Ellos son (a) liderazgo Lean en construcción, y (b) trabajo en equipo.

En adelante, para cada una de las categorías se presentan conceptos contruidos a partir del conocimiento de los expertos. Estos fueron consultados acerca de las características que demuestran madurez en cada categoría; en este sentido, para la categoría personas se asocian diversas características que más adelante se relacionarán con los atributos del SLC-EModel.

- **Liderazgo Lean en construcción.** Se refiere a aspectos relacionados con la forma de actuar y el comportamiento que desarrollan los seres humanos para la realizar sus actividades. En este FM se incluyen aspectos relacionados con el comportamiento humano, las formas de pensar y de actuar, la cultura y las costumbres para el desarrollo de líderes. Los líderes son las personas que motivan y promueven el cambio. Se busca que ellos se desarrollen en todos los niveles en la organización y que sean personas empoderadas de las acciones de implementación, uso y desarrollo de LC. En la medida en que se cuenta con personas con una visión diferenciada, con conocimiento Lean, la madurez pasa también por la formación y desarrollo de personas que impactan positivamente el desarrollo del proyecto.
- **Trabajo en equipo.** Este factor integra aspectos relacionados con la educación, el aprendizaje y el entrenamiento de las personas organizadas en grupos de trabajo para participar en procesos LC. Estos procesos en equipo permiten transmitir conocimientos, valores, costumbres y formas de actuar. La formación es el proceso por el cual una persona aprende y se instruye en conocimientos con lo cual se busca generar un cambio cultural, moral y conductual. Su actitud para el trabajo en equipo permite a las personas conformar equipos de trabajo que son la base para la realización de cada una de las tareas del proyecto, toda vez que en este tipo de proyectos se requiere el trabajo en equipo de los grupos de trabajo. Se busca desarrollar equipos de trabajo empoderados y comprometidos con el desarrollo del proyecto.

Sistema de producción

El sistema de producción integra toda la gama de actividades que se requieren para llevar un producto o servicio desde su concepción, a través de las

diferentes fases de producción, hasta la entrega al consumidor final, y la disposición final después de su uso.

En el desarrollo del sistema de producción se busca realizar, entre otras, la implementación completa de las herramientas LC seleccionadas, la incorporación de pruebas piloto, orientación hacia más enfoque y atención a las necesidades del cliente, una perspectiva holística y la solución de problemas de raíz. Se busca también estandarizar y garantizar diseños completos y precisos, establecer un sistema de incentivos, así como despertar la conciencia de que el proceso correcto producirá el resultado correcto.

Un sistema de producción que madura es aquel que cuenta con la disciplina del mejoramiento continuo, que es capaz de verse a sí mismo de forma crítica, que es capaz de adaptarse y de repetir el ciclo. Un sistema con un alto nivel de madurez difícilmente llega a considerarse a sí mismo terminado o perfecto; es capaz de lograr que las cosas se hagan como deben hacerse, que se estandaricen, que se repitan, que se conserven y se mejoren para luego subir de nivel y realizar nuevamente el ciclo. Cada mejora conduce a que las personas aprendan, estandaricen, repitan y finalmente se evalúen para mejorar y dar el salto al siguiente nivel.

La encargada de la producción en una empresa constructora es el área de gestión de proyectos. En esta se desempeñan muchas funciones que el corporativo realiza; es la estructura administrativa que sostiene la empresa. El proyecto exige servicios de la organización, por ejemplo: ordenar materiales, lo que se hace a través del área de compras y del área financiera que autoriza los pagos. Si se requiere personal, el área de recursos humanos debe proveerlo, sea de otros proyectos o mediante convocatoria pública o privada, según el caso.

Una visión compartida por los expertos de la verdadera madurez establece que se alcanza en el momento en el cual las empresas que aplican los principios utilizan herramientas, construyen una cultura y demuestran que los resultados son cada vez mejores para el desempeño del proyecto. Esto se aprecia cuando la calidad mejora. Esta mejora de calidad se ve con la reducción de reclamos posventa, la reducción de reprocesos y el cumplimiento en los plazos, entre otros; todo esto en función de haber desarrollado un proceso adecuado.

En general, es muy importante demostrar que hay resultados; esto se lleva a cabo con base en los indicadores reales de mejoramiento del desempeño en los factores claves del proyecto, lo cual permite identificar el avance del proceso de madurez.

Algunas de las acciones que contribuyen con la madurez del sistema de producción resaltadas por los expertos se presentan a continuación:

- Los procesos deben estar documentados y estandarizados; deben existir mecanismos para mejorar los procesos y para garantizar que se aplique mejoramiento continuo.
- Verificar la continuidad de los procesos y disponer de indicadores que permitan comparar los estados del proceso de producción.
- Propiciar un flujo continuo de producción y proveer un adecuado proceso logístico sincronizado con un sistema de planificación y control del trabajo.
- Utilizar técnicas que permitan desarrollar un sistema de producción *pull*.
- Utilizar herramientas de producción para llevar a cabo un proceso más flexible y desarrollar técnicas de producción más flexibles con empleados más flexibles.
- Adaptar prácticas y herramientas específicas a las diferentes fases del proyecto.

Esta categoría incluye dos FM: (a) el mejoramiento del sistema de producción, y (b) el mejoramiento de la producción.

- **Mejoramiento del sistema de producción**

Este FM recoge las acciones e intervenciones que contribuyen a mejorar el sistema de producción para mejorar el flujo, reducir las pérdidas en el sistema y estabilizarlo, de manera que la producción sea más eficiente. El sistema de producción soporta la producción del proyecto de construcción.

- **Mejoramiento de la producción**

En este FM se integran acciones e intervenciones para incrementar la producción soportada en una mejoría constante del sistema de producción. Con relación a la mejora de la producción se establecen condiciones para identificar la mejora de la productividad resultado de un SPPC en continua mejoría.

Soporte organizacional a la producción del proyecto

Las organizaciones, de acuerdo con Barahona (1988), son “estructuras sociales en las que el conjunto de sus integrantes desempeña un sistema de actividades, coordinado de forma consciente y con racionalidad limitada, en la búsqueda de determinados objetivos” (p. 226). Las organizaciones están compuestas por sistemas interrelacionados que cumplen funciones especializadas.

En esta categoría de FM se agrupan aspectos relacionados con la estructura de la organización, los medios o procedimientos necesarios para llevar a cabo un fin determinado, el flujo o manejo de recursos, comunicación, entre otros. Asimismo, se han definido tres factores: (a) compromiso de la alta dirección, que incluye sus actitudes, (b) soporte operativo a la producción y (c) ambiente de trabajo.

Al mismo tiempo que el proyecto realiza requerimientos razonables y cumple las condiciones del corporativo, se espera que el corporativo garantice el cumplimiento de esas condiciones ofrecidas, porque de lo contrario el proyecto se afecta, se atrasa y resulta más costoso. Desde este punto de vista, valdría la pena que la organización tuviera un sistema de Lean Management para que las demás áreas cumplan con el acuerdo que tienen con el área de producción.

Una relación madura es aquella en la que todas las partes cumplen con el contrato, son capaces de actualizar el contrato, de actualizar sus necesidades para mejorarlas y de proponer modificaciones a los procedimientos para mejorarlos. La misma lógica que aplica producción de manera aislada debe ser aplicada en su relación con otras áreas de la empresa. En este sentido, sería raro que una empresa que implemente una gestión Lean de proyectos de construcción, no aplique Lean Management.

Un sistema de producción que usa LC debe ser un sistema estable, repetible, eficiente, que haga buen uso de los recursos, predecible en su comportamiento. Debe proporcionar ambientes de trabajo seguros para las personas, de tal manera que si un operario observa que la empresa no se preocupa por las medidas de seguridad, por los equipos, por los protocolos de seguridad, y no tiene un buen tratamiento de los accidentes y de las inconformidades, rápidamente va a sospechar que la empresa no lo aprecia, no lo estima, no lo cuida, y si siente que la empresa no se preocupa, entonces no tendría razones para ser leal a ella y tener una actitud proactiva frente al trabajo.

Es importante contar con un alto nivel de madurez en cuanto a la conceptualización y el entendimiento de la filosofía. Esta importancia radica en que el despliegue de LC permita al proyecto cumplir sus metas. No vale de nada contar con un alto nivel de madurez, si al final esto no lleva a una mejora en el sistema de producción y a obtener los mejores resultados del proyecto y en todos los niveles de la organización. Esta es una propiedad emergente del sistema, la manera en que la implementación mejora el desempeño del sistema. Esta mejora debe estar monitoreada por medio de indicadores. Independiente de la utilización de herramientas, se espera que se demuestre que se está enfocado en realizar acciones de mejoramiento más que en estandarizar. El resultado final es el proceso de mejoramiento

continuo, desarrollado y sostenible. Son aspectos que demuestran madurez de LC en la GPC:

- Los acuerdos de servicio entre las áreas del proyecto que son fundamentales para saber si una empresa está madurando o no. Se debe resaltar el concepto de cliente interno.
- Articular los procesos de la organización para apoyar la cadena de valor.
- Verificar que la información desarrollada en la etapa de planificación llegue a la construcción y garantizar que no haya reprocesos.
- Verificar cómo se desarrolla la comunicación y después de más de un ciclo de proyectos se puede verificar la mejora.
- La gestión tecnológica y la innovación.
- La gestión logística del PC en todas sus fases.
- La gestión contractual.

Compromiso de la alta dirección

En este atributo se integran aquellos aspectos que están relacionados con los medios o las ayudas que se tienen para conseguir un fin o satisfacer una necesidad desde la alta dirección, la cual proporciona los recursos adecuados para apoyar la transformación cultural, tener una mentalidad de orden y contar con la participación de todos en la organización. De igual manera, propicia la estrategia con la que se establece un equilibrio de los intereses de todos los participantes, se incorporan lecciones aprendidas, el intercambio de información de manera apropiada, la mejora de la coordinación y la cooperación y la reducción de los niveles jerárquicos. Direcciona el desarrollo de estrategias para garantizar una comunicación efectiva y abierta, establecer relaciones más cercanas y colaborativas con proveedores, clientes y consultores, apoyar la transformación del pensamiento, los métodos de trabajo, promover la integración, la coordinación y la cooperación, entre otros.

Soporte operativo a la producción

El área de producción en una empresa constructora es la de gestión de proyectos. En ella, el corporativo desempeña muchas funciones; es la estructura administrativa que sostiene la empresa. Así, si la gestión de la producción implementa LC, básicamente todos los procesos deben estar estandarizados y se deben conocer, para cada una de las áreas de la organización, los tiempos que demoran en atender las solicitudes del proyecto. Una de las cosas que deberían suceder es que las relaciones entre los proyectos de construcción y las áreas corporativas se estandaricen y se conozcan los procesos entre dichas áreas en función del proyecto.

Ambiente de trabajo

El ambiente de trabajo se construye con la participación de todas las personas. Por ello, la seguridad en el sitio de trabajo adquiere mucha importancia para el desempeño del proyecto en todas sus fases. Entonces, en términos de madurez, en las relaciones entre la gestión de la empresa y la gestión completa del proyecto, cobra importancia hacer énfasis en que se está estudiando la GPC y no la gestión del corporativo. Así, si la gestión de la producción implementa Lean, el ambiente de trabajo debería experimentar una mejora que propicie la mejora continua.

Indicadores de madurez

Considerando que se busca identificar la madurez de LC, se genera una idea de indicadores asociados con el estado de madurez que el SPPC vaya adquiriendo con la implementación de LC. Uno de los aspectos en la identificación de la madurez de LC en la GPC son los resultados observables de mejoramiento. En el proceso, uno de los aspectos a considerar cuando se trate de decidir si la madurez está evolucionando son los resultados. Si no se ven resultados que demuestren mejoras, entonces el proceso no está avanzando.

Un nivel de implementación indicado con un simple número no explica mucho, los resultados pueden ser alterados, pues si la persona sabe cómo será evaluada, sabrá cómo comportarse. Entonces, los indicadores deben ser a prueba de fraude, deben ser claros, que muestren los resultados de los factores que están presentes al mismo tiempo.

Estos indicadores se refieren al desempeño del SPPC de manera general, el indicador global de madurez, el índice global de madurez (IGM); al desempeño de cada uno de los conceptos que agrupan elementos que evidencian la madurez, los indicadores locales de madurez (ILM); al desempeño de cada uno de los elementos de madurez que componen el concepto de madurez cuyo indicador se basa en los niveles individuales de madurez, o la madurez del atributo identificado con el índice de madurez del atributo (IMA). Estos índices se resumen en la Tabla 3.1.

Estos índices están asociados con los elementos del modelo. Los índices propuestos están agrupados en los índices de la investigación realizada y los formulados para investigaciones futuras, los cuales se presentan en el Capítulo 4.

Tabla 3.1. Indicadores de madurez y forma de medición

Índice de madurez de atributos IMA	Índice local de madurez ILM	Índice global de madurez IGM
Identifica el alcance de la madurez del atributo al evaluar cada una de las características asociadas a él en cada una de las fases del proyecto.	Identifica el alcance de la madurez de cada factor de madurez en el modelo. Esta madurez se alcanza a partir de la madurez de los atributos asociados al factor y la influencia de otros factores que le preceden.	Identifica el alcance de madurez de LC en el sistema de producción de proyectos de construcción.
Se evalúa en campo cada atributo para cada fase del proyecto con ayuda de la herramienta SLC-MAET.	Se calcula con ayuda del SLC-QM que es la herramienta que califica la madurez a partir del resultado de la evaluación	Se calcula por medio del SLC-QM a partir de los resultados de la madurez de los factores.

Una evaluación del estado de madurez es la “foto” instantánea del estado del sistema. Podría decirse que es la “foto” que muestra lo que está sucediendo luego de la aplicación de planes y proyectos de mejora para elevar el desempeño del sistema de producción del proyecto de construcción. Después de obtener la información del nivel de madurez del estado, se da inicio nuevamente al ciclo de mejoramiento; es por esto que los indicadores para el modelo en términos del IGM y los ILM corresponden a indicadores de resultados. En tanto se llevan a cabo los planes de mejoramiento, se monitorean los índices relacionados con los atributos, los cuales corresponden a indicadores de proceso seleccionados para mostrar de manera precisa el estado actual. Con los ILM se construyen los perfiles de madurez que muestran el estado de madurez alcanzado por la GPC con la utilización de LC.

De otra parte, es importante definir cuáles son los tipos de mejora en eficiencia y en resultados que se espera obtener con la implementación de LC. Un ejemplo en manufactura puede ser la reducción en el número de productos defectuosos, un aumento medible en el uso de los operadores y materiales. Entonces, ¿en LC en la GPC qué es el equivalente? Se sugiere plantear este tipo de mejoras esperadas en eficiencia consistentes con el tipo de proyecto y el entorno en que se desarrolla:

- Proyectos que cumplen con la promesa de valor en términos de costo, tiempo, alcance y calidad.
- Proyectos con bajos o nulos indicadores de accidentalidad y pérdida de tiempo a causa de estos.
- Aumento en la rentabilidad del negocio en términos precisos, 10% a 15%.

Modelos de madurez como herramientas de mejoramiento

Los modelos de madurez de capacidades no son exclusivos de los sistemas de información, ámbito donde tuvieron su origen. Estos incluyen niveles que representan el desarrollo del proceso en evaluación y los elementos de medición para determinar el nivel de madurez alcanzado. Con estas evaluaciones de las capacidades del sujeto de interés, se comprueban sus competencias para mantener un desempeño consistente en el tiempo, y son utilizadas para la mejora en el proceso en que se busca madurar, considerando estrategias organizacionales.

El objetivo de esta sección es desarrollar una base conceptual respecto de los MM e integrar los elementos básicos para la construcción del SLC-MM, tales como: definiciones, selección de los niveles de madurez, luego de realizar un estudio de MM potenciales para ser adaptados a la integración de LC en la GPC principalmente.

El modelo de madurez

Un modelo de madurez es una forma de representar de manera sencilla los elementos esenciales de los procesos eficaces (Paulk, Curtis, Chrissis y Weber, 1996). Este concepto, presentado por Crosby (1979) en su representación del cuadro de madurez de la gestión de la calidad, o Quality Management Maturity Grid (QMMG, por su sigla en inglés), tiene como base los conceptos de control estadístico de procesos y mejora continua integrados en el desarrollo de Paulk *et ál.* (1996). Con el modelo se puede conocer la situación actual de los procesos organizacionales respecto a la gestión de la calidad. Crosby (1979) precisa que los costos de la calidad referidos al comportamiento de las ventas es una de las maneras de cuantificar los beneficios de pasar de un nivel de madurez a otro.

Más adelante, se desarrolló el modelo de madurez de la capacidad de los procesos por la Universidad Carnegie Mellon para el Software Engineering Institute (SEI), por solicitud del Departamento de Defensa del Gobierno Federal de los Estados Unidos de América, para los procesos de desarrollo de *software* en 1987, y el modelo de madurez de capacidades para el desarrollo de *software*, o Capability Maturity Model for Software (SW-CMM, por su sigla en inglés). A partir de 2001, se presentó una nueva versión el modelo de integración de modelos de madurez de capacidades, o Capability Maturity Model Integration (CMMI, por su sigla en inglés), que contribuye a la mejora y evaluación de procesos para el desarrollo, mantenimiento y operación de sistemas de *software*. Los modelos de capacidades realizan medición a través de niveles; con esta medición las organizaciones pueden guiar la mejora de sus procesos (Hwang, 2009). Los niveles muestran el es-

tado de los procesos en su camino hacia la madurez (Crosby, 1979), lo cual ha sido adoptado por muchas organizaciones como forma de realizar una autoevaluación para determinar las estrategias que se deben seguir (Wiele, Brown, Millen y Whelan, 2000).

En su investigación, Wendler (2012) plantea, desde una perspectiva lingüística, que:

[...] el propósito de los modelos que se ocupan de la madurez es describir las condiciones en las que determinados objetos examinados alcanzan los mejores (perfectos) estados para el propósito previsto. Por ejemplo, estos objetos pueden ser las capacidades de desarrollo de *software*. Además, tiene que haber un estado “final” de la madurez (plenitud de crecimiento) en el que ningún desarrollo adicional es posible (p. 1318).

Sin embargo, desde la investigación realizada se considera que no hay un estado final de madurez, pues cuando se alcanza el nivel más alto, se desafía el proceso para ir más allá; de esto se trata el mejoramiento continuo.

¿Qué evalúa el modelo de madurez?

Un modelo de madurez evalúa *el nivel en que se logra la excelencia*; se compone de factores, criterios de valoración y niveles de madurez. Estos modelos son referentes prácticos que ayudan a las organizaciones a medir el punto en que se encuentran en el camino hacia la excelencia, analizando las brechas para alcanzarla. Así mismo, sirven como marco de trabajo referencial, como una herramienta de diagnóstico organizacional, convirtiéndose en instrumento de desarrollo e incentivo para el alcance del éxito y la competitividad organizacional. Un aspecto que no debe perderse de vista es el hecho de que la evaluación y el MM en sí mismos deben ser usados para identificar potenciales mejoras.

Al aplicar un MM, las organizaciones desarrollan habilidades de gestión y consolidan estructuras para la creación de valor de manera continua y sostenida por medio de procesos de mejoramiento e innovación que contribuyen a reducir la brecha de competitividad en temas como productividad y efectividad. Las organizaciones toman medidas estratégicas para que todas las personas en ellas hablen el mismo idioma para el mejor desempeño del proyecto. El crecimiento de las empresas depende del compromiso del personal; por esto se debe motivar continuamente al personal para influir en que siempre pueden ser mejores. En este sentido, la madurez de cada empresa depende del compromiso y conocimiento de todos los interesados en la gestión de la producción del proyecto. En esto, la comunicación juega

un papel muy importante para garantizar la adecuada interpretación de la información.

La investigación realizada clasificó y estudió 58 MM y herramientas de evaluación del desempeño de LC en diferentes entornos: tecnologías de información, gestión de proyectos, manufactura y construcción. El propósito de esa revisión fue identificar el MM más apropiado para adaptarlo con el fin de evaluar la madurez de LC en la GPC; sin embargo, no se seleccionó ninguno de estos modelos y se desarrolló uno nuevo, debido a la forma en que se desarrolló la investigación, lo que se explica con el desarrollo del modelo en el Capítulo 4.

Evaluar la madurez, un proceso organizacional participativo

Los MM son herramientas pertinentes de evaluación para que las organizaciones puedan guiar sus esfuerzos de transformación a nivel empresarial. Esto se puede realizar al conocer el estado actual de la organización, sus fortalezas y debilidades, la participación de las personas, las necesidades que requieren de acciones inmediatas, etc. En función de transformaciones que hagan ala organización más eficiente y que produzca mejores resultados para beneficio del negocio (Perkins, Abdimomunova, Valerdi, Shields y Nightingale, 2010). Sin embargo, la evaluación debe considerar un alcance mayor para que se pueda obtener el beneficio que se requiere. Esto implica que todas las personas involucradas en el desarrollo del SP comprendan claramente la importancia de la evaluación para adelantar decididos procesos de mejora.

De acuerdo con Crosby (1979), la evaluación debe ser un proceso participativo, que promueva una autoevaluación como un proceso continuo en el propósito de buscar la mejora continua. En este sentido, se debe planear cuidadosamente el proceso de evaluación para garantizar que se lleve a cabo efectiva y eficientemente, y que los resultados de la evaluación sean precisos y confiables (Abdimomunova y Valerdi, 2010). Los resultados deben ser evaluados también de manera participativa para que se conviertan en planes consensuados y comprometidos, planes que son previstos y desarrollados por quienes están involucrados con el cambio. Como recomendación de la investigación, deben ser producto de la autoevaluación en un entorno LC.

Definición del modelo de madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con Andersen y Jessen (2003), la evaluación de madurez está sujeta a un alto nivel de subjetividad, la cual se reduce con el uso del MM de acuerdo con el nivel de precisión. El MM representa un estándar con el

cual se compara para llevar a cabo la evaluación (Tapia, Daneva, Van Eck y Wieringa, 2008). Debido a la necesidad de contar con una referencia teórica de trabajo, en la investigación, la autora definió el modelo de madurez de LC en la GPC (SLC-MM) como el estándar del ciclo completo de la gestión del SPPC con el uso de LC. Este estándar permite identificar el alcance progresivo de las características de excelencia de cada uno de los elementos que lo componen.

De acuerdo con Nesensohn (2014), “los MM son indispensables para las organizaciones cuando quieren medir la corriente de capacidad organizativa” (p. 36).

Los MM son motores de cambio con un enfoque más sistemático y ordenado que reduce los errores y garantiza la calidad mientras se genera una base comparable de la evolución de la madurez. De igual manera, los MM ofrecen información para entender la evolución del sujeto en estudio en el tiempo. Esta evolución se percibe en los factores de estudio, los FM y los elementos asociados a ellos. Esta afirmación de la autora se contrasta con los estudios de Tapia *et ál.* (2008), Khoshgoftar y Osman (2009) y Wang, Xiao, Li y Li (2011), referenciados por Nesensohn (2014).

Niveles de madurez del modelo de madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con la revisión bibliográfica y la consulta a expertos, se identificaron los cinco niveles de modelos de madurez más comunes. Estos niveles ofrecen escalas más fáciles de entender para clasificar un estado. Cinco niveles permiten distinguir entre los niveles bajos (1.0 para procesos de madurez incipientes, 2.0 para procesos bajos de madurez con algún grado de avance), el intermedio 3.0 y los altos 4.0 y 5.0.

El SLC-MM cuenta con cinco niveles de madurez, de los cuales el primero puede ser usado como el estándar que permite evaluar el estado de una organización cuyo interés es iniciar la implementación de LC. Con los tres primeros niveles se estabiliza el sistema y en los dos últimos está inmerso un ciclo reforzador de control y mejoramiento.

Niveles de madurez de modelos de madurez de referencia

El primer modelo de madurez del que se tiene noticia fue propuesto por Philip B. Crosby en 1979 a partir de entender que las organizaciones pasan por cinco etapas de madurez en cada una de las categorías en que se desarrolla la gestión. Más adelante, el CMMI fue desarrollado por los investigadores del Instituto de Ingeniería de Software de la Universidad Carnegie Mellon (CMM en su primera versión); y como líder del proyecto para el Departamento

mento de Defensa de los Estados Unidos, Watts Humphrey (Goksen, Cevik y Avunduk, 2015; Humphrey, 2002) estaba preocupado por el cumplimiento de los contratistas. Posteriormente, este modelo ha sido utilizado por los contratistas en Estados Unidos con positivos reportes de incremento de la productividad y la rentabilidad del negocio que lo hicieron muy popular.

El objetivo del modelo de madurez se centra en evaluar la capacidad de los contratistas responsables de la ejecución de sus proyectos. Es una de las iniciativas de mejora de procesos más ampliamente adoptadas en la industria del *software* y más frecuentemente adaptada a otros sectores (Glazer, Dalton, Anderson, Konrad y Shrum, 2008). Una gran cantidad de los conceptos de mejora de procesos básicos presentes en el CMMI son genéricos y esto ha propiciado su aplicación, lo que lo hace potencialmente interesante para ser aplicable a la construcción.

El modelo cuenta con cinco niveles de madurez por los cuales el proceso debe pasar para mejorar de forma sostenible (Nesensohn, Bryde, Ochieng y Fearon, 2014; Paulk *et ál.*, 1996). Estos niveles se muestran en la Tabla 3.1. Para cada nivel, el CMMI cuenta con prácticas estandarizadas para identificar, a través de ellas, la madurez. Se identifican los niveles de madurez, y cada uno de ellos corresponde a la capacidad de los procesos.

En 1999, aparece el mejoramiento de procesos estandarizados para empresas de construcción (Spice, por su sigla en inglés), un modelo de madurez desarrollado específicamente para la construcción, que muestra muchas similitudes con el CMMI. Una de ellas está en la definición de cinco niveles de madurez. Según la investigación realizada, entre los expertos consultados hay consenso en que los niveles apropiados para un MM deben ser cinco. No se considera un nivel cero (0), este es solo el indicador de que no existe evidencia del proceso en evaluación. Los cinco niveles se consideran para este estudio de manera similar a los niveles del modelo Spice, con modificaciones propias de la integración de LC en la GPC. Los cinco niveles para el modelo de madurez han sido definidos tomando como referencia a Sarshar *et ál.* (2000), Siriwardena, Kagioglou, Jeong, Haigh y Amaratunga (2005) y Sun, Vidalakis y Oza (2009). Más recientemente, Nesensohn (2014) propone en su modelo cinco niveles de madurez que se relacionan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Niveles de madurez definidos para cinco modelos de madurez

Nivel	Crosby 1979	CMMI 1996	SPICE 1999	LCMM 2014	SLC-EModel 2019
1	Incertidumbre	Inicial	Inicial / Caótico	Incierto	Inicial
2	Despertar	Repetible	Planeado y seguido	Despertar	Repetible
3	Ilustración	Definido	Comparte buenas prácticas	Sistemático	Sistemático
4	Sabiduría	Gestionado	Cuantitativa- mente controlado	Integrado	Gestionado
5	Certeza	Optimizado	Mejorado con- tinuamente	Desafiante	Desafiado

Fuente: elaboración propia.

Identificación del estado de madurez de la gestión de producción de proyectos de construcción antes de LC

La GPC en las organizaciones se desarrolla de diferentes maneras. Se integran tecnologías o estrategias de gestión para sus proyectos o sus procesos van desarrollándose de manera *ad hoc*. En cualquiera de las versiones, la organización cuenta con procesos, por medio de los cuales apoya y avanza en el desarrollo de la GPC y la producción misma. En este sentido, es conveniente diagnosticar el estado actual de la GPC antes de iniciar la implementación de LC para reconocer la distancia entre el estado actual de la GPC y lo que sería un primer nivel referido al MM. Para esta identificación, se usa el MM a fin de entender, con respecto del estándar, qué procesos de los que realiza la organización tienen características Lean, con los cuales se cuenta para iniciar un proceso de madurez de la GPC con la integración de LC. Esto es a lo que la investigación realizada ha denominado “un estado caótico”.

Las organizaciones llevan a cabo procesos que podrían ser enmarcados en conceptos Lean, sin que la misma organización se haya percatado de esta condición. También se integran técnicas, herramientas y hasta algunos conceptos de LC que se han conocido e implementado en algunas áreas de trabajo. Una evaluación preliminar con la aplicación del MM reconoce los procesos que las organizaciones de construcción aplican en esa búsqueda de la eficiencia; sin embargo, es importante contar con una adecuada orientación para alcanzar un primer nivel de madurez.

Para iniciar una implementación, la capacidad del proceso es impredecible, se cambia o modifica constantemente a medida que avanza el trabajo, y tiene que ver con las aptitudes de los individuos hacia el apoyo de procesos

institucionales. No obstante, el éxito del proceso está en cabeza de los líderes y, si estos ya no están, el proceso se desordena, se vuelve caótico. En este nivel, el equipo del proyecto es “reactivo” a los cambios.

Niveles de madurez del SLC-MM

A continuación, se presentan los niveles de madurez definidos para esta investigación. Para cada uno de ellos se integran conceptos que direccionan su desarrollo.

- **Nivel 1. Inicial**

Este es el nivel básico del modelo. Es muy importante, pues corresponde a la herramienta que conduce la implementación inicial de LC. En este nivel se integran los procesos, las prácticas y las herramientas a la GPC en cada una de las categorías, de acuerdo con el estándar definido para el proceso. Sin embargo, la atención se centra en la aplicación del estándar. Los estándares se conocen y se desarrollan en la medida en que se han aprendido, y lo que se busca es llegar a estabilizarlos.

Capacidad: la capacidad del proceso está enfocada en aplicar y estabilizar la implementación de LC en la GPC.

- **Nivel 2. Repetible**

Se establecen protocolos y procedimientos sistemáticos para repetir los procesos. El proceso se controla y se documenta de acuerdo con los procedimientos establecidos previamente acordados. Un proceso bien definido incluye descripciones y modelos estándares para realizar el trabajo, mecanismos para verificar que el trabajo se ha realizado correctamente y criterios de finalización, que proporcionan una buena visión del progreso. Los procesos para todas las actividades están documentados.

Capacidad: en este nivel se integran los estándares y se repiten. De igual manera, se integran prácticas exitosas de proyectos como estándares de trabajo.

- **Nivel 3. Sistemático**

Los procesos se integran con otras funciones de la GPC, y se implementa un sistema de medición dedicado, de manera sistemática. El equipo del proyecto es solidario para gestionar los cambios. Se trata entonces de un sistema integrado y disciplinado. En este nivel se evalúa el estándar y se mejora. Se desarrolla la capacidad para capturar y compartir buenas prácticas en toda la GPC. Todos los proyectos utilizan una versión aprobada y adaptada del proceso estándar de la organización.

Capacidad: establecer la disciplina para mantener el estándar, el cual se revisa y mejora constantemente. Se capturan y comparten buenas prácticas referenciadas.

- **Nivel 4. Gestionado**

El nivel anterior permite el desarrollo de una disciplina para el trabajo. En este nivel se debe desarrollar un proceso de control objetivo del proceso. Se definen los estándares y se asegura que se sigan fielmente. Durante la ejecución del proyecto, las actividades son controladas, evaluadas y mejoradas. Un proceso efectivo puede describirse como uno que se practica, documenta, aplica, capacita, evalúa y puede mejorar. Se busca reducir la variabilidad en el rendimiento del proceso como parte de estrategias para medir la productividad y la calidad.

Capacidad: realizar el control del proceso para reducir su variabilidad.

- **Nivel 5. Desafiado**

El proceso se mejora continuamente para evitar cualquier repetición de fallas. Este nivel está enfocado en aprender y mejorar continuamente para identificar las debilidades y fortalecer los procesos de manera proactiva y colaborativa. Las innovaciones que se refieren a las mejores prácticas se identifican y transfieren en todo el proceso de la GPC. Una GPC nivel 5 es más flexible comparada con los niveles inferiores y permite adaptarse fácilmente a los cambios.

Capacidad: desarrollar el mejoramiento continuo. El nivel 5 no es el final, solo es el punto de partida para definir un “nuevo” nivel 5.

Calificación de la madurez de los atributos en el modelo

Cada atributo en el modelo se desarrolla para que contenga los cinco niveles de madurez, por medio de los cuales se alcanza sistemáticamente dicha madurez.

En el SLC-MM, los atributos del MM incluyen en los niveles de madurez procesos clave para cada una de las fases de desarrollo del proyecto. Estos procesos permiten identificar el nivel de madurez de los atributos. En este sentido, cada nivel de madurez de atributos contiene los requisitos para alcanzarlo, lo que incluye la descripción (la rúbrica), su alcance y los indicadores relacionados. Para que la GPC con LC alcance el nivel superior de madurez, todas las fases deben alcanzar el mismo nivel.

Como se ha explicado, el desarrollo de los niveles de madurez de los atributos será objeto de una investigación posterior. Estos niveles deben integrar cuidadosamente cada uno de los procesos clave con el nivel de

detalle suficiente para que la evaluación cuente con todos los elementos que reduzcan la subjetividad. Lo consignado en este apartado corresponde a lineamientos que deben ser integrados al desarrollo de la herramienta de evaluación de los atributos; en este modelo esta herramienta se denomina SLC-MAET, cuya utilidad se explicará más adelante.

Para la calificar los FM se requiere evaluar las características de madurez de los atributos con elementos cuantitativos a partir de evaluaciones cualitativas. Se establecen las rúbricas que especifican los estados de madurez del atributo. Se define en el texto el nivel de desempeño y se realiza la observación en campo para identificar el nivel obtenido de acuerdo con lo establecido en la rúbrica. Los valores de los indicadores no deberían estar asociados taxativamente a una escala numérica del 100%, sino a una rúbrica con la cual se observa el sujeto de interés, en este caso el atributo, para identificar su nivel de madurez.

Evaluar el subnivel de madurez de los atributos

Hay un aspecto particular de la evaluación del atributo que permite reportar un subnivel del alcance de madurez. Este subnivel servirá para identificar el estado del alcance de la madurez del atributo cuando esta no se reporte en un nivel superior a pesar de alcanzar algunas de las características de dicho nivel. Se trata de *evaluación de la progresión del alcance de madurez del atributo*.

La evaluación del atributo se califica en un intervalo entre *inmaduro*, *casi maduro* y *maduro*. *Inmaduro* corresponde a un intervalo abierto entre 0 y 0,5, en el cual no están incluidos ni el 0 ni el 0,5; *casi maduro* corresponde a un intervalo cerrado a la izquierda en el cual está incluido el 0,5 pero no el 1 (0,5 - 1); y *maduro* corresponde a 1, o sea, el alcance del nivel en evaluación. Esta evaluación contiene un alto grado de subjetividad; sin embargo, es un indicador de avance del proceso y sirve a la evaluación para identificar cuánto le falta al atributo para alcanzar el nivel de madurez que se evalúa para ser completado.

Estrategia de evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con Crosby (1979), para realizar mejoras que lleven a evolucionar, basta fijarse en el siguiente nivel de madurez para identificar las medidas que deben acometerse para tal fin y formular la manera de llegar a ese punto. Es conveniente realizar transiciones suaves entre niveles y con una orientación que priorice este avance de acuerdo con las capacidades de la organización (Figura 3.2). Estas prioridades están directamente relacio-

nadas con los beneficios y los resultados que se pretende alcanzar con la implementación de LC en la GPC. Entender cómo se contribuye a establecer metas a corto plazo para lograr progresivamente las metas del largo plazo, como se discutió en la sección 3.1.2.

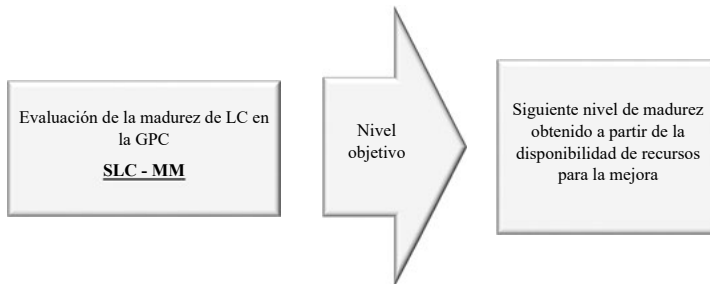


Figura 3.2. Estrategia de evolución de LC en la GPC.

Fuente: elaboración propia.

IDENTIFICACIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

RESUMEN

El modelo de evolución de Lean Construction (SLC-EModel) apoya la selección de la estrategia más adecuada que permita a la organización incrementar el nivel de madurez en la GPC a partir del conocimiento de su estado actual de madurez. Dicho estado se identifica con la ayuda de un MM, el cual contiene el estándar con que se evalúa cada uno de los elementos, conformados como un sistema, involucrados en la madurez de LC en la GPC. La evaluación da lugar a la calificación de madurez, la cual se expresa por medio de índices. El modelo de calificación desarrollado en la investigación realizada permite obtener índices locales y, a partir de ellos, un índice global de madurez; todos ellos explican la madurez del sistema como un todo.

En este capítulo se presenta la identificación de los elementos asociados con la madurez de LC en la GPC, la construcción del modelo de ecuaciones estructurales (SEM), que es la herramienta con la que se identifican las relaciones entre los elementos del sistema y la identificación misma de las relaciones de madurez entre los elementos del sistema.

IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ASOCIADOS CON LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Como se definió en la investigación realizada, la madurez es aquel estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. En este sentido, la organización dispone de mayor capacidad para manejar el ciclo de vida del proyecto de manera cada vez más eficiente haciendo uso de los recursos necesarios para tal fin. Para desarrollar el modelo de evolución, se requiere conocer cuáles son los elementos involucrados en la madurez y la manera en que ellos se encuentran relacionados. En esta sección se identifican los elementos que componen el SLC-EModel a partir de una exhaustiva revisión de referencias académicas sobre diferentes iniciativas de evaluación de LC y de información primaria obtenida de expertos en LC consultados en el desarrollo de la investigación. Los elementos identificados se agrupan en factores de madurez (FM), los cuales componen las categorías de madurez que conforman el SLC-EModel.

Identificación de los elementos de las categorías de madurez

Un estudio exploratorio inicial sobre barreras y factores críticos de éxito en la implementación de LC (Cano *et ál.*, 2015; Mano *et ál.*, 2018) dio como resultado una primera agrupación de estos en categorías y factores, de acuerdo con características comunes de los elementos estudiados. Esta primera agrupación en categorías mostró que podrían ser usadas para estructurar más adelante el modelo. Posteriormente, se adelantó una revisión de referencias académicas en las que se identificó un amplio número de elementos relacionados con la madurez, los cuales se contrastaron con los obtenidos en dos etapas de entrevistas a expertos. En primer lugar, los elementos identificados se agruparon alrededor de tres *categorías de madurez* —definidas en el trabajo anteriormente mencionado— como primer nivel jerárquico para el modelo. Para todas las categorías, estos elementos dieron lugar a cincuenta y cinco temáticas referidas por diversos autores. Más adelante, por medio de una validación por expertos, se seleccionaron de estos cincuenta y cinco, los cuarenta y ocho atributos de madurez para continuar con la investigación, los cuales con ayuda de una herramienta de análisis estadístico multivariado se agrupan en los *factores de madurez*, la segunda jerarquía del modelo. A su vez, los elementos agrupados en cada factor de madurez dieron lugar al tercer nivel jerárquico del modelo, *los atributos de madurez*. Los cuarenta y ocho atributos fueron objeto de consulta a expertos

con el fin de precisar, por medio de su importancia para la madurez de LC en la GPC, aquellos relevantes para el estudio. De esta forma se seleccionaron treinta y cinco atributos.

En entrevistas con expertos se obtuvieron 148 elementos y de la bibliografía, 277, para un total de 425 elementos relacionados en la madurez de LC. Estos elementos se agruparon en tres categorías, siete FM y treinta y cinco atributos de madurez. Todos estos elementos más adelante son objeto del estudio de sus relaciones, influencia y dependencia con ayuda del SEM. A partir de este conocimiento se propuso la estructura del modelo de madurez (SLC-MM) y los índices de calificación local y global de esa madurez.

En este punto, en el desarrollo de la investigación se previó que un primer nivel de madurez del modelo debería conducir un proceso de implementación de LC en la GPC, lo cual es el punto de inicio de un proceso de evolución de la madurez.

Los elementos se agruparon en tres categorías y treinta y cinco atributos, así:

- Personas: 133 elementos agrupados en nueve atributos.
- Sistema de producción: 196 elementos agrupados en trece atributos.
- Soporte de la organización: 116 elementos agrupados en trece atributos.

Estos treinta y cinco atributos componen y explican los siete factores de madurez del SLC-MM. La Figura 4.1 muestra el esquema de los FM asociados a las categorías que se describen a continuación.

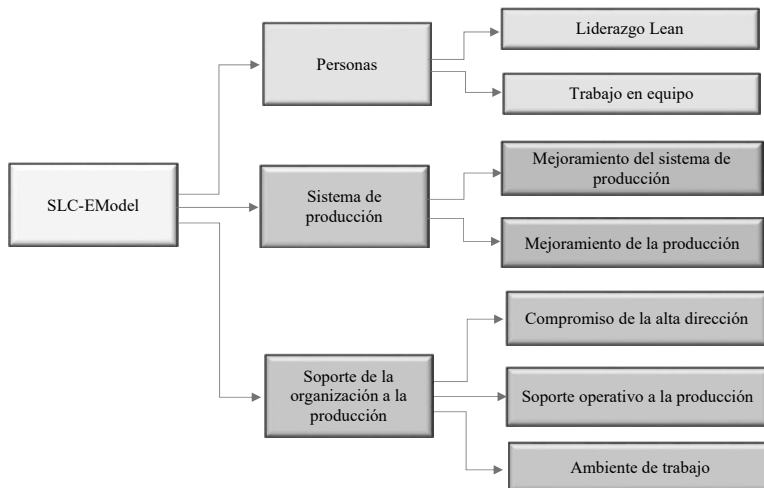


Figura 4.1. Estructura del SLC-EModel.

Fuente: elaboración propia.

Categoría personas

La categoría personas que soportan la producción de proyectos de construcción (PSP) está conformada por los FM *liderazgo Lean y trabajo en equipo*, y agrupan los atributos directamente relacionados con las actitudes, las aptitudes, las habilidades, las destrezas, la formación de las personas para LC en todos los niveles de la organización, la construcción de una cultura alrededor del crecimiento de LC, una cultura que promueva el trabajo en equipo, la solución de problemas, el aprendizaje continuo y la mejora continua. Esta categoría cuenta con nueve atributos que se presentan en la Tabla 4.1. En las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se presenta la categoría, la denominación de cada FM y los atributos. A los FM se les asigna una variable Y_j , y a los atributos X_i . En esta notación Y identifica al factor y el subíndice j denota la cantidad de factores en el modelo, los atributos se denotan por X y el subíndice i corresponde a uno del total de atributos en el modelo. Esta notación será usada más adelante en la construcción del modelo para el análisis de relaciones entre los elementos de madurez. En la columna identificación se muestra el código del atributo que se utiliza más adelante para la construcción del SEM y que está referido en el modelo haciendo uso del *software* WarpPLS.

Categoría sistema de producción de proyectos de construcción

La categoría sistema de producción de proyectos de construcción (SPP) integra principalmente los principios LC agrupados en dos factores: uno enfocado en la mejora del sistema de producción, y otro en la mejora de la producción. Asociados a estos dos factores se presentan trece atributos, diez de los cuales corresponden directamente con los principios LC cuya aplicación impacta el sistema de producción; uno referente al cumplimiento de la oferta de valor, uno para el desarrollo de un sistema *pull*, y otro que corresponde al desarrollo de estándares (ver Tabla 4.2).

Categoría soporte de la organización al proceso de producción de proyectos de construcción

La categoría soporte de la organización al proceso de producción de proyectos de construcción considera tres factores: el compromiso de la alta dirección, el soporte operativo a la producción y el ambiente de trabajo. Corresponden a los procesos del corporativo que apoyan la producción. Son trece atributos en tres FM (ver Tabla 4.3).

Tabla 4.1. Categoría personas: factores y atributos

Categoría	Factor	Atributo	X _i	Identificación
Personas que soportan la producción de proyectos de construcción	Liderazgo	Formación en la filosofía LC	X ₁₉	LDC2
	Lean	Cultura Lean	X ₂₀	A1
	Lean	Crecimiento y desarrollo de líderes Lean	X ₂₁	LL1
	Leadership (LeaderSh)	Valores y visión personal	X ₂₂	A2
	Trabajo en equipo	Promoción y desarrollo de Lean Construction	X ₁	LL2
	TeamWork (TeamWork)	Solución de problemas y aprendizaje continuo	X ₂	PS2
		Procesos de trabajo en equipo	X ₃	TW2
		Desarrollo de los equipos de trabajo	X ₄	TW1
		Promoción de la mejora continua	X ₅	LL3

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.2. Categoría sistema de producción: factores y atributos

Categoría	Factor	Atributo	X _i	Identificación
Sistema de producción de proyectos de construcción	Mejoramiento del sistema de producción System Production Improve (SPImprov)	Flexibilidad	X ₂₃	PIM2
		Reducción del tiempo de ciclo	X ₂₄	WI4
		Reducción de la variabilidad	X ₂₅	WI3
		Control del proceso completo	X ₂₆	FC3
		Simplificación de procesos	X ₂₇	PIM1
		Transparencia	X ₂₈	PIM3
		Benchmarking	X ₂₉	PIM4
	Mejoramiento de la producción Production Improvement (ProImpr)	Desarrollo de estándares	X ₃₀	WPS1
		Conocimiento y selección de herramientas Lean Construction	X ₃₁	TU1
		Flujo continuo	X ₃₂	WI1
		Cumplimiento de la oferta de valor	X ₃₃	FC1
		Desarrollo de un sistema <i>pull</i>	X ₃₄	PPC2
		Mejoramiento continuo	X ₃₅	FC2

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.3. Categoría soporte de la organización al proceso de producción de proyectos de construcción: factores y atributos

Categoría	Factor	Atributo	X _i	Identificación	
Soporte de la organización al proceso de producción de proyectos de construcción	Compromiso de la alta dirección	Definición y despliegue de la política y la estrategia para apoyar la construcción Lean	X ₉	HMC1	
		Top Management Commitment (CommTM)	Apoyo continuo para el desarrollo de un sistema de producción Lean Construction	X ₁₀	HMC2
			Enfoque en la filosofía	X ₁₁	HMC3
	Soporte operativo a la producción	Operative Support for the Production (SupporOp)	Resultados del negocio	X ₁₂	IBP1
			Gestión del conocimiento	X ₁₃	INN2
			Operaciones logísticas	X ₁₄	SCLO2
			Proceso de gestión contractual	X ₁₅	IBP4
			Implementación de un sistema de gestión	X ₁₆	IBP3
			Sistemas de información	X ₁₇	CIF1
	Ambiente de trabajo	Work Environment (WorkEnv)	Apoyo al proyecto con los procesos de organización	X ₁₈	IBP2
			Participación de las personas en la construcción del ambiente de trabajo	X ₆	WE1
			Interacción en el entorno de trabajo	X ₇	WE2
		Aprendizaje y entrenamiento para la seguridad en el sitio de trabajo	X ₈	WS2	

Fuente: elaboración propia.

En los factores de esta categoría se agrupan atributos relacionados con la filosofía, la estrategia para apoyar el desarrollo de LC, los resultados que impactan el proceso (con los cuales se toman decisiones), la información y la comunicación, la cadena de suministro, los procesos de la organización al servicio del proceso de producción y la construcción del ambiente de trabajo en que se desenvuelven las personas.

En la siguiente sección se describe cómo se realizó la construcción del SEM a partir de la identificación de las categorías, los FM y los atributos.

MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES APLICADO A LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

La selección del SEM para el desarrollo de la investigación obedece al entendimiento del tipo de información que se requiere para el estudio. Esta información corresponde a la identificación de las relaciones entre los elementos responsables de la madurez que habían sido seleccionados previamente. Se consideró el uso de dinámica de sistemas, sin embargo, esta herramienta exige el conocimiento de las relaciones y es precisamente lo que se requiere identificar. También se consideró realizar análisis con el método para toma de decisiones como el Analytic Hierarchy Process (AHP) para seleccionar los elementos que se encuentran relacionados; sin embargo, ninguna de estas metodologías ofreció condiciones favorables para ser usada en la investigación. De esta manera, la experiencia investigativa de uno de los directores de investigación orientó el uso de SEM, con lo cual se diseñó el instrumento de recolección de información para ser aplicado y la información recolectada usada en la investigación al usar el SEM con los datos obtenidos.

La madurez es una condición que no es fácil de observar directamente, por lo que requiere ser explicada a partir de otros elementos articulados como un sistema. La madurez es entonces un constructo que requiere de variables que miden directamente las características de interés. Estos constructos se denominan variables no observables o latentes y requieren de variables observadas para explicar dichos constructos, con los cuales se proponen hipótesis que se prueban con ayuda de una herramienta diseñada para tal fin: un modelo de ecuaciones estructurales (SEM) (Cupani, 2012; García *et ál.*, 2011; Chandra, 2015). Las hipótesis planteadas por investigadores y expertos sobre la evaluación de la madurez se plasman en el SEM propuesto, el cual es puesto a prueba y evaluado en su nivel de ajuste; de esta manera se identifica en qué medida el fenómeno estudiado se comporta. El SEM permite realizar un análisis exploratorio y otro confirmatorio del modelo.

Con los elementos clasificados en categorías, FM y atributos, se construye el SEM, con el cual se revelan las relaciones entre los elementos. El SEM permite validar las relaciones, entre las variables latentes. La madurez de cada FM permite construir un índice para cada uno de ellos, que se ha denominado índice de madurez local (IML), y con todos los índices locales se construye el índice global de madurez (IGM) que corresponde a la madurez de LC en la GPC. La información para la construcción del SEM se obtuvo de una encuesta aplicada a 111 expertos en diecinueve países.

Métodos para analizar la información obtenida para el estudio de las relaciones entre elementos de madurez de LC en la GPC

El SEM es una técnica que hace uso de la regresión múltiple y el análisis factorial con los cuales permite la evaluación de interrelaciones de dependencia complejas (Cupani, 2012). Para la evaluación de la madurez de LC en la GPC, en la investigación se utilizaron métodos estadísticos como el análisis de componentes principales, análisis factorial, regresión múltiple, Path Analysis, los cuales permiten distinguir y operar variables observadas y variables no observables o latentes, conformadas a partir de los elementos responsables de la madurez identificados en la sección anterior. Las variables latentes no pueden ser medidas directamente; se miden por medio de las variables observadas; representan conceptos unidimensionales, constructos, y están alineadas con la teoría del tema de interés. De otra parte, las variables manifiestas u observadas se miden directamente de un experimento diseñado para obtener la información de interés. Para su uso en la investigación, las variables latentes se denominaron factores de madurez (FM) y las variables observadas, atributos.

Es un método para analizar la información requerida para la evaluación de la madurez de LC en la GPC; además de distinguir y operar variables latentes y variables observadas, calcular el valor de las variables latentes, evaluar relaciones de dependencia múltiple y cruzada entre variables, evaluar la importancia relativa de cada predictor, probar hipótesis referentes al nivel de ajuste del modelo propuesto y evaluar la significación de las relaciones entre las variables. Para este propósito, existen varias técnicas estadísticas que cumplen con las características mencionadas, entre ellas se cuentan: regresión múltiple, análisis de discriminante, análisis de varianza, regresión logística, análisis factorial y análisis de clústeres.

Investigadores como Haenlein y Kaplan (2004) explican las limitaciones de estos métodos, entre otras, que todas las variables deben ser observadas y sus mediciones obtenidas a través de un experimento, que deben ser medidas sin error y que se trata de un modelo estructural simple. Los estudios requieren de análisis de muchas variables, así que considerar la relación entre una o dos variables no es una situación del mundo real. Finalmente, cualquier medición en el mundo real contiene un error, ya sea aleatorio o sistemático, debido al método de medida.

El modelo de ecuaciones estructurales, por su parte, corresponde a un método que cumple con las características requeridas para evaluar un fenómeno como la madurez. Estos modelos utilizan elementos técnicos como análisis de senderos, análisis factorial y regresión múltiple o componentes principales. Cuentan con un modelo de medida y un modelo estructural que

los hacen más robustos que la utilización por separado de las técnicas presentadas. Una de las características más relevantes de los SEM es la identificación del modelo, que especifica relaciones entre variables. La identificación del modelo requiere de varias características: aceptación teórica del modelo, eliminación de modelos equivalentes, indicadores aceptables del modelo y replicación de los resultados con muestras independientes. De esta manera, la evaluación de madurez se puede realizar a través de un SEM desarrollado explícitamente para ello. En el Anexo 4.1 se presenta en detalle el contexto teórico relacionado con el SEM articulado con el desarrollo de la investigación realizada.

Los principales enfoques para la evaluación de modelos estructurales son: el enfoque de varianza y el enfoque de covarianzas. En el desarrollo de este trabajo se utilizó el enfoque de covarianzas, debido a que permite usarse para confirmaciones teóricas de relaciones con un número reducido de variables y observaciones. Más adelante, se presentan los resultados y el análisis de la evaluación para el cual se consideró este enfoque de covarianzas y la utilización del *software* WarpPLS, cuya licencia está a cargo de la Universidad Autónoma de Juárez y que fue dispuesta para la investigación. Se realiza el análisis estadístico para el modelo de medida y el modelo estructural, se presentan los resultados obtenidos, así como el esquema de ponderación utilizado en el modelo interno o estructural.

Modelos de ecuaciones estructurales

Para realizar el estudio de fenómenos complejos, como algunos fenómenos sociales, psicológicos y, en particular, el fenómeno de la madurez, tema central de la investigación, se utilizan métodos multivariados. Corrientemente, para abordar este tipo de análisis, se usan técnicas de regresión múltiple, el análisis factorial, el análisis multivariante de la varianza y el análisis discriminante. Sin embargo, su limitación está en que solo pueden examinar una relación al tiempo, incluso el análisis multivariante de la varianza, el cual solo representa una relación entre variables dependientes e independientes (Cupani, 2012; Hair, Anderson, Tatham y Black, 1995). Estas limitaciones plantean la necesidad de utilizar técnicas de mayor nivel que superen las limitaciones de las técnicas mencionadas, como los SEM.

Los SEM han sido utilizados sobre todo en el campo de las ciencias sociales en la evaluación de variables no observables a partir de variables observables; además, permiten identificar y analizar relaciones entre estas variables no observables. Son una familia de modelos estadísticos multivariantes que pueden ser utilizados para estimar el efecto y las relaciones entre múltiples variables. Es una combinación de algunas técnicas multivariadas

como la regresión múltiple, el análisis de caminos, o Path Analysis, y el análisis factorial (Kahn, 2006). Permiten estudiar simultáneamente relaciones de dependencia entre variables dependientes e independientes, siendo muy importantes las relaciones en las cuales una variable dependiente se convierte en independiente. Otro análisis que facilitan los SEM es la identificación de los efectos distintos de las mismas variables en cada una de las variables dependientes (Hair, Anderson, Tatham y Black, 1999).

Los SEM dan más flexibilidad a los modelos de regresión. Combinan la regresión múltiple y el análisis factorial con cuya información resultante se pueden evaluar interrelaciones de dependencia, además de considerar los efectos del error de medida sobre los coeficientes estructurales al mismo tiempo (Cupani, 2012). Matemáticamente, estos modelos son más complejos de estimar que otros modelos multivariantes como los de regresión o análisis factorial exploratorio; es algo así como resolver varios modelos de análisis factorial al mismo tiempo. Los SEM tienen la capacidad de estimar y evaluar la relación entre las variables latentes, así como la validez de cada una de ellas. Se puede utilizar una variedad de medidas para representar el constructo y controlar el error de medición específico de cada variable, a diferencia de otras técnicas de análisis en las cuales los constructos pueden ser representados con un único resultado y no se puede modelar el error relacionado con la medición.

En la construcción del SEM, se propone el tipo y dirección de las relaciones que se esperan encontrar entre variables en el modelo. Así, luego de proponer el modelo, se estiman los parámetros de las relaciones propuestas a nivel teórico. Un SEM puede ser utilizado como modelo confirmatorio si, a partir de la teoría, se busca comprobar las relaciones usadas como base del modelo; o exploratorio, si lo que se busca es identificar precisamente las relaciones entre las variables según la información contenida en ellas. Estos modelos no prueban la causalidad, solo ayudan a seleccionar hipótesis causales relevantes apoyadas en los datos, de tal manera que, de las relaciones que se proponen, se seleccionan aquellas que representan los datos recolectados para el experimento (Weston y Gore, 2006).

El SEM está compuesto por dos submodelos: el de medida y el estructural.

- **El modelo de medida** o modelo externo (*Outer Model*) establece la relación entre los FM y sus indicadores, que son los atributos, y obedece las reglas del análisis de factores. La Figura 4.2 corresponde al modelo de medida de la investigación identificado con los atributos asociados a los FM. El objetivo del modelo de medida es confirmar qué tan correlacionados están los atributos para explicar o identificar

los FM. Si estos atributos cuentan con altos valores de correlación, indica que el investigador ha acertado en las relaciones entre las variables (Weston y Gore, 2006).

- **El modelo estructural** o modelo interno (*Inner Model*) relaciona los FM. Describe las relaciones entre ellos, se hace uso de técnicas multivariantes como la regresión múltiple, el análisis factorial y el análisis de senderos. Uno de los supuestos fundamentales del SEM es que las variables dependientes tienen cierta variación no explicada por la variable latente que es atribuible al error de medición (Cupani, 2012), y la varianza del error debe ser modelada. En la Figura 4.3 se presenta el modelo estructural desarrollado para esta investigación.

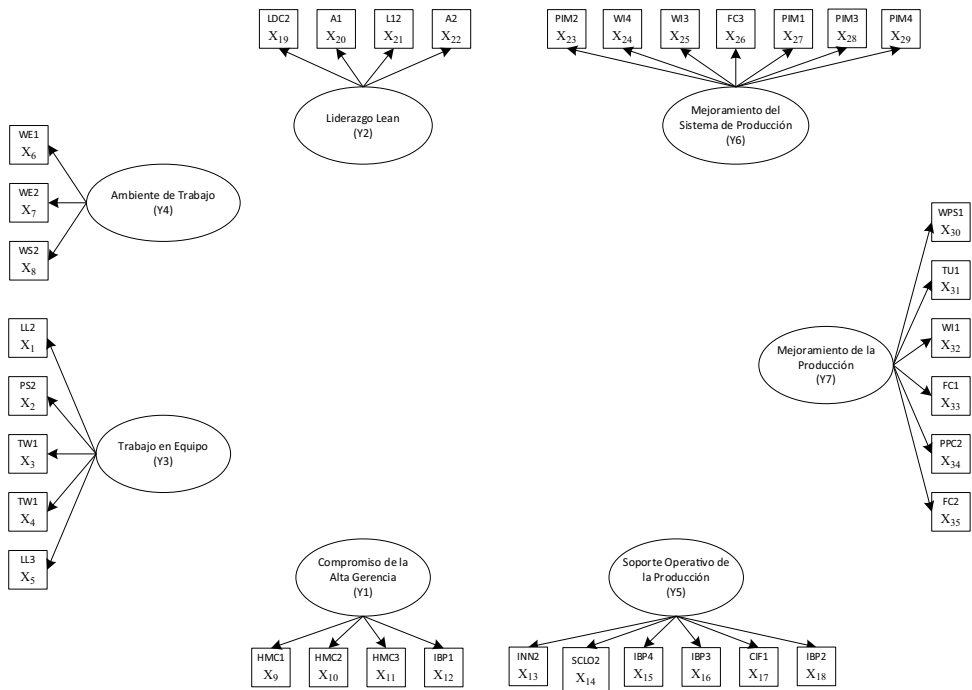


Figura 4.2. Modelo de medida u Outer Model.

Fuente: elaboración propia.

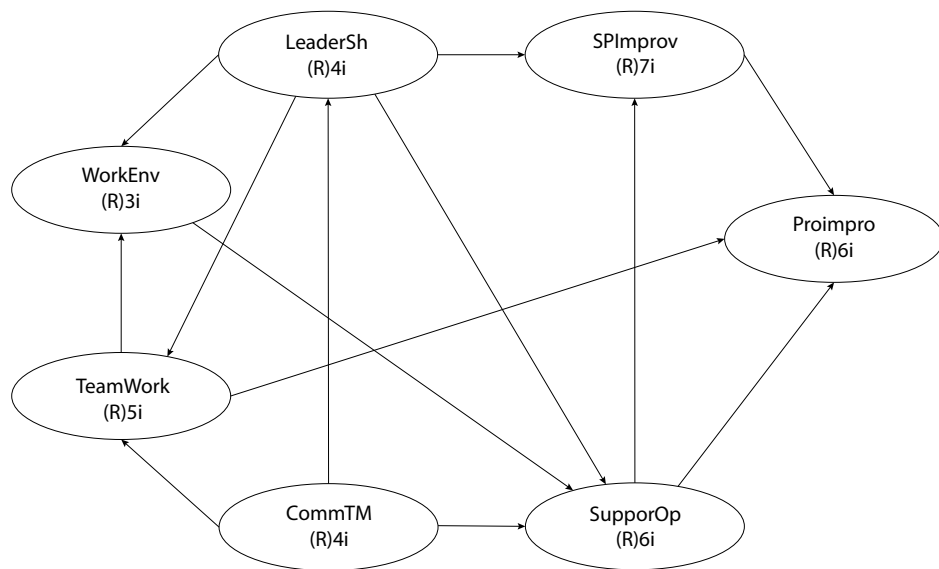


Figura 4.3. Modelo estructural o Inner Model.

Fuente: elaboración propia.

El proceso de construcción del modelo de ecuaciones estructurales

El modelo de ecuaciones estructurales permite resolver dos problemas: (a) revelar las relaciones entre todos los elementos categorizados para identificar las interacciones entre ellos y, (b) entender la función de cada uno de los elementos en el proceso de madurez con el fin de conducir el desarrollo del modelo de evolución que es el interés de la investigación.

Existen tres estrategias para el desarrollo del SEM:

- **Modelización confirmatoria:** Se especifica el modelo aislado y se utiliza el SEM para evaluar, por medio de los resultados estadísticos, su desempeño o ajuste. Este modelo probablemente es uno de muchos posibles modelos que pueden ser propuestos y no necesariamente es el mejor, lo que se denomina un sesgo confirmatorio.
- **Modelos rivales:** Permiten evaluar el modelo propuesto con relación a diferentes modelos alternativos, e identificar el modelo que facilite el mejor nivel de ajuste y, por tanto, seleccionar el mejor modelo.
- **Desarrollo del modelo:** Con un modelo propuesto, se busca mejorarlo sistemáticamente al modificar el modelo de medida o el estructural. Aquí se proponen modelos diferentes para encontrar uno nuevo.

La investigación realizada utilizó la estrategia del *desarrollo del modelo*. El modelo propuesto fue especificado con un arreglo de atributos que se agrupan y explican alrededor de los FM. Con ayuda del análisis factorial se

confirmó que la ubicación de los atributos en cada uno de los FM fuera consistente con su aporte de variabilidad a cada uno de ellos. Se propusieron las relaciones a probar entre los FM, las cuales se fueron cambiando mediante diferentes configuraciones de relaciones hasta encontrar la que, a juicio de la investigadora, representaba el mejor ajuste para el estudio.

Recolección de información

La recolección de información se llevó a cabo por medio de la encuesta de importancia de atributos en la madurez de LC en la GPC (EMA); en la encuesta, cada pregunta corresponde a un atributo de madurez. Es importante notar que un instrumento de medida como la encuesta propuesta para la recolección de información debe tener relevancia, congruencia, suficiencia y claridad. Adicionalmente, la información recolectada debe ser objeto de una validación racional y una validación estadística. Los métodos de recolección de información están explicados en el Capítulo 1.

En la aplicación de la EMA se solicitó la participación de 256 expertos en LC en varios países del mundo: investigadores, practicantes y profesores, de los cuales 111 respondieron. Para la identificación de estos expertos, se hizo uso de las referencias utilizadas en la investigación, obtenidas en el proceso de revisión de bibliografía. Con base en esas referencias, se incluyeron otros expertos que aparecen como coautores en las investigaciones referenciadas. También se hizo uso de la red de profesionales LinkedIn para encontrar contactos de otros expertos en LC como parte del círculo profesional de expertos en esa red.

La EMA incluyó preguntas referentes a la importancia del atributo para la madurez de LC¹¹, cuyas respuestas se evaluaron en una escala de Likert (1932) de 1 a 5, donde 1 correspondía a: *el atributo no es importante en la madurez de LC en la GPC*; 2, *el atributo es ligeramente importante en la madurez de LC en la GPC*; 3, *el atributo es importante en la madurez de LC en la GPC*; 4, *el atributo es muy importante en la madurez de LC en la GPC*; y 5, *el atributo es extremadamente importante en la madurez de LC en la GPC*.

Validación racional

Para seleccionar los atributos que conforman la EMA usada para esta validación racional, se aplicó el índice de Aiken a un grupo de cincuenta y

¹¹ Los atributos referidos a las categorías en las que se agrupan fueron presentados en la sección "Identificación de los elementos asociados con la madurez de Lean Construction..." en la página 162

cinco atributos inicialmente identificados (Aiken, 1980; 1985), con lo cual se pudieron confirmar cuarenta y ocho atributos para conformar la EMA a expertos. De acuerdo con la recomendación del método del índice de Aiken, se requiere un mínimo de ocho expertos, los cuales se integraron a la investigación, cuatro de ellos en Colombia y cuatro en Santiago de Chile.

Para consultar a estos ocho expertos, se desarrolló una encuesta específica que fue aplicada personalmente. Para la encuesta se definió una escala de 1 a 10. Los dos conceptos extremos en esta escala corresponden a: 1, *el atributo no es importante para estudiar la madurez de LC en la GPC*, y 10, *el atributo es extremadamente importante para estudiar la madurez de LC en la GPC*. Por parte de los expertos no fue sugerido ningún atributo adicional. Se tuvo en consideración que si, en la aplicación de la encuesta, alguno de los atributos fuese calificado en el nivel 1 por al menos el 51 % de los expertos, se eliminaría del estudio.

Validación estadística de la información recolectada en la encuesta

En este punto se verificó la validez estadística de la información obtenida para las cuarenta y ocho variables en la EMA; esto se llevó a cabo con el cálculo del índice Alfa de Cronbach que permite medir la fiabilidad de la escala de medida para la madurez, la magnitud no observable directamente –la cual es construida a partir de las variables observadas– y los atributos –los cuales deben mostrar mediciones estables y consistentes con un elevado nivel de correlación entre ellos– (Cronbach, 1951).

En la medida en que el valor obtenido para el Alfa de Cronbach se aproxime a 1,0, mayor será la fiabilidad de la escala. En este caso, en las respuestas de la EMA para los atributos se obtuvo un valor para el Alfa de Cronbach 0,960 (índice calculado con ayuda del *software* SPSS18 licenciado para la Universidad del Valle). El criterio de aceptación considera que valores del Alfa de Cronbach superiores a 0,7 son suficientes para garantizar la fiabilidad de la escala. Con el valor obtenido de 0,960 se confirmó la fiabilidad de la escala y se verificó que la selección de expertos ha sido apropiada de acuerdo con Cronbach (1951).

Valores perdidos y valores fuera del rango

La matriz de datos obtenidos para este estudio no presenta datos perdidos o *Missing Data*, ni valores fuera del rango de calificación. Esto se debe a que la EMA, al ser realizada por medio de la aplicación Google Forms, permitió seleccionar, en su diseño, una instrucción que exige responder todas las preguntas. De igual manera, no hay valores fuera del rango de evaluación

debido a que los expertos seleccionaron su calificación de una serie de opciones restringidas y no hubo espacio para otro tipo de calificación.

Selección de atributos para conformar los factores de madurez

Con las respuestas de la EMA se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con los cuarenta y ocho atributos para buscar una forma eficiente de agrupamiento que diera origen a diferentes conceptos referenciados por expertos en LC, o que estuviesen documentados en la literatura académica. Una condición que exige el uso de PCA es que las variables tienen que distribuirse normalmente; por lo cual, los datos se transforman utilizando el método del logaritmo para cada una de las columnas de los atributos. Los datos también se estandarizan. No se requiere realizar tratamiento de datos para eliminar valores fuera de rango, ni reemplazo de valores faltantes.

La técnica de PCA ayuda a reducir la cantidad de atributos al agruparlos en lo que se ha denominado en esta investigación los FM. Sin embargo, al aplicar PCA a los cuarenta y ocho atributos sin considerar su agrupación en categorías, el resultado de esta primera forma de agrupamiento no promovía conceptos LC como se esperaba. Esta situación condujo a aplicar el PCA para los atributos agrupados en cada una de las tres categorías de madurez. Esta decisión estuvo fundamentada en el trabajo previamente realizado de agrupación, según las categorías propuestas en Cano *et ál.* (2015), y en la búsqueda de conceptos LC a partir de los constructos resultantes. Estos atributos se presentan en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

Al aplicar PCA a los atributos en cada una de las categorías, los FM resultantes sí ofrecen la representación de conceptos conocidos y documentados en LC. Los atributos que identifican los FM están altamente correlacionados. Los atributos de manera individual explican un comportamiento particular; sin embargo, al estar reunidos en los FM explican un comportamiento de mayor nivel. En este sentido, cuando un atributo contiene la misma información que otro, uno de ellos es eliminado del conjunto por explicar el mismo comportamiento. De esta manera y con la aplicación de este criterio, se eliminaron trece de los cuarenta y ocho atributos cuestionados en la EMA, y quedaron treinta y cinco agrupados en siete FM. Un modelo construido de esta forma busca ser más simple y contener la información precisa que se requiere. El objetivo de la utilización de PCA es la construcción del modelo para esta investigación con un número preciso de FM.

En este punto es importante explicar que se puede construir el SEM sin realizar previamente un PCA por medio de la agrupación de atributos que efectúa el *software* WarpPLS, el cual hace esta agrupación por medio de

un análisis factorial (AF). El uso del PCA fue específico para esta investigación, pues permitió un ahorro significativo de tiempo para identificar los mejores arreglos para la construcción de los FM, ya que, al agrupar las variables observadas según el contenido de variabilidad de los atributos correlacionados, fue más precisa la conformación de estos constructos. El AF se concentró en el modelo de medida, y con esta información se pudo ajustar la selección de atributos asignados a los FM según sus cargas factoriales. Los conceptos bajo los cuales se agruparon los atributos representan de manera muy precisa los conceptos estudiados en la teoría, estos son:

- compromiso de la alta dirección
- soporte operativo a la producción
- ambiente de trabajo
- liderazgo Lean
- trabajo en equipo
- mejoramiento del sistema de producción
- mejoramiento de la producción

En la conformación de los FM, el criterio de agrupación de los atributos se realiza con los valores propios, estos deben ser superiores o iguales a 1,0. El valor propio indica los FM que se pueden obtener a partir de los atributos estudiados. Para la conformación de cada FM se verifica que el aporte de variabilidad del grupo de atributos en el FM sea superior a 0,5. Esto es, para un $R^2 = 0,5$, el valor de variabilidad R de 0,7 se considera un valor con alto contenido de variabilidad; de esta forma, el criterio de inclusión de los atributos es superior o igual a 0,7 de varianza (García, 2011). En la Figura 4.4 se muestra la configuración del modelo con los atributos que explican cada FM.

Construcción del modelo de ecuaciones estructurales

De acuerdo con Cupani (2012), los expertos en SEM consideran seis pasos que se deben seguir para aplicar esta técnica:

1. Especificación del modelo
2. Estimación de parámetros
3. Identificación del modelo
4. Evaluación del ajuste
5. Re-especificación del modelo
6. Interpretación de resultados (Kaplan, 2000; Kline, 2011).

En la siguiente sección se detallan los aspectos relacionados con la construcción del SEM, análisis y validación de la información contenida en él.

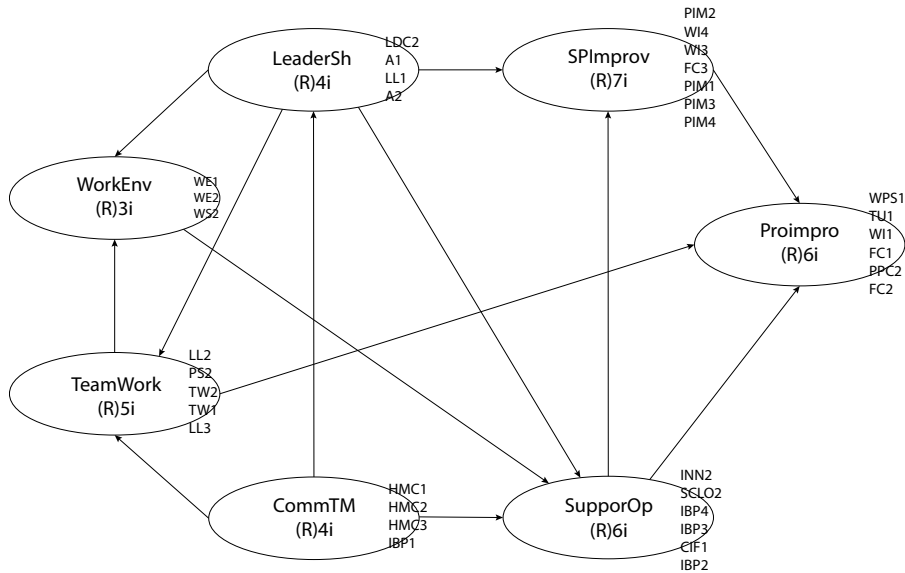


Figura 4.4. Atributos asociados a los factores de madurez (FM).

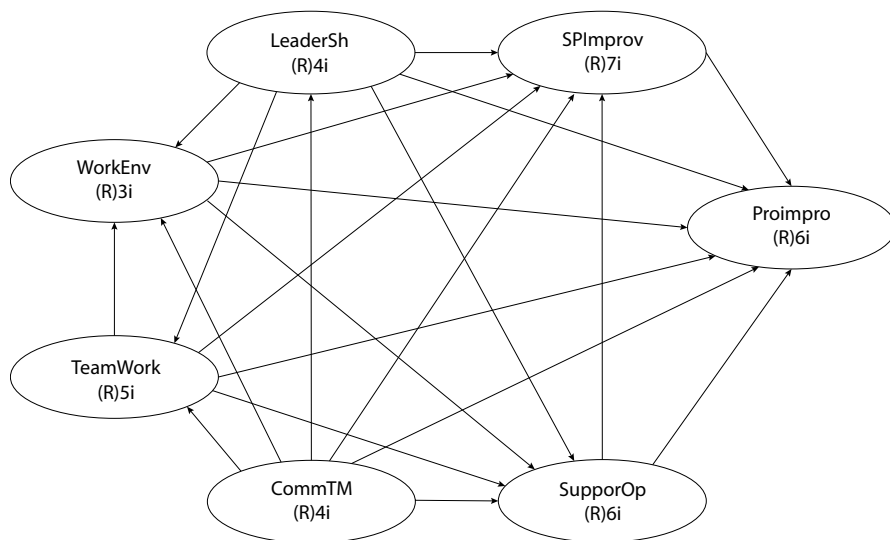
Fuente: elaboración propia.

Especificación del modelo

En primer lugar, se propone un modelo empírico para el SEM, en el cual se establecen todas las relaciones posibles de los FM (Figura 4.5), con base en la experiencia de la investigadora y en la interacción con los expertos. Este modelo, de acuerdo con el método de SEM, debe ser recursivo, lo que implica una dirección de las influencias, sin que se presenten efectos retroactivos o bucles entre los FM.

Este modelo se compone de los FM y los atributos asociados a ellos, los cuales explican cada uno de los FM. Es importante definir el tamaño de muestra adecuada para aplicar la EMA, la cual, de acuerdo con Kline (2011), debe tener entre 10 y 20 participantes por parámetro observado. Para el SEM, los parámetros observados son 35, lo que exige un mínimo de 350 encuestas contestadas; sin embargo, la forma en que se estructuró el modelo inicial permite una menor selección de parámetros, considerando el FM que cuenta con el mayor número de relaciones debidas a los atributos que lo explican y los efectos que reciben del FM.

Para realizar el AF, en este modelo, según la recomendación de Kline (2011), se requiere obtener un mínimo de 120 encuestas contestadas para contar con una fuente de información confiable. En esta investigación se consideró un mínimo de 10 participantes por parámetro, así que, con 12 parámetros de la variable con más relaciones se necesitaron 120 respuestas. La estimación del número de encuestas requeridas se explica a continuación.



**Figura 4.5. Relaciones propuestas entre los factores de madurez (FM).
Modelo empírico.**

Fuente: elaboración propia.

Con los atributos agrupados en cada uno de los FM y las relaciones propuestas entre FM, se identificaron los FM con mayor cantidad de interacciones, tanto los atributos asociados a los AF como de los efectos recibidos de otros FM. Esto dio como resultado los FM mejoramiento del sistema de producción (SPImprov) y mejoramiento de la producción (ProImpr) con doce relaciones cada uno.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se identifican las relaciones para estos FM: SPImprov cuenta con siete relaciones que corresponden a los atributos que lo explican y cinco efectos de los FM liderazgo Lean, soporte operativo, compromiso de la alta dirección, trabajo en equipo y ambiente de trabajo, no se considera el efecto de este FM en otros. ProImpr cuenta con seis atributos que lo explican y seis efectos de los FM liderazgo Lean, soporte operativo, compromiso de la alta dirección, trabajo en equipo, ambiente de trabajo y mejoramiento del sistema de producción.

Se recibieron 111 respuestas, 7,5% por debajo de las requeridas según Kline (2011); sin embargo, se decidió avanzar en la consolidación de la estructura del modelo con estas respuestas. Esta decisión guarda particular importancia, pues, a pesar de que no se contaba con el número mínimo recomendado de encuestas respondidas, con ayuda del *software* para la aplicación del SEM se descartaron relaciones no significativas. Una vez se confirmaron cuáles de las relaciones previstas en el SEM eran significativas, se verificó que se requerían noventa respuestas para el análisis de la

información. Así, el FM con más parámetros a estimar fue el mejoramiento del sistema de producción. Este FM cuenta con nueve relaciones: los siete atributos que lo explican y dos relaciones efectos de los FM, liderazgo Lean y soporte operativo. De esta manera, las 111 respuestas fueron suficientes para adelantar el estudio, las veintiún respuestas adicionales a las noventa requeridas representan el 23 % por encima del mínimo requerido.

Creación del modelo en ecuaciones estructurales (SEM)

Una vez identificados los FM, se precisó la estructura del SEM, se corrió el programa y se confirmó la correlación entre los atributos de cada FM con ayuda del AF. El criterio de agrupamiento confirmó que los atributos se integran al FM con valores de varianza por encima de 0,6 (por debajo de 0,5 indica que los atributos explican de manera inadecuada el FM). Las cargas factoriales (CF) altas de los FM corresponden con una matriz de estructura (es decir, no girada); mientras que las cargas cruzadas son bajas y corresponden a una matriz de patrón (es decir, girada).

En la creación del SEM puede darse una situación en la cual algún atributo, a pesar de estar bien correlacionado en el FM, se ubica mejor en otro FM aunque no ofrezca una CF alta. En el modelo, por ejemplo, se dio esta situación: el atributo IBP1 mostró una CF de 0,616 en el FM compromiso de la alta dirección; sin embargo, el AF mostró que estaría mejor ubicada en el mejoramiento del sistema de producción con CF de 0,659. Entonces se probó cambiarla de lugar y el modelo desmejoró su ajuste. Este atributo regresó al FM original en el cual contribuyó a un mejor ajuste del SEM. El atributo mostró más adherencia a las decisiones que toma la alta dirección que al mejoramiento del sistema de producción, respectivamente. Las CF de cada atributo agrupado en cada FM se presentan en el Anexo 4.2 (Tabla A4.2 que es la misma Tabla A4.1.3 del Anexo 4.1).

Estimación de parámetros del modelo

Los parámetros para estimar el modelo corresponden a las CF de los atributos para cada uno de los FM con los que están relacionados, a los valores de los β entre los FM y a los errores asociados con los atributos y a los FM. Entonces, el número de parámetros a estimar es la sumatoria de:

- cantidad de parámetros para atributos: 35
- cantidad de parámetros para los factores de madurez: 7
- los valores de β entre factores de madurez: 13
- errores para los atributos: 35
- errores para los factores de madurez: 7
- número de parámetros a estimar (NPE): $35 + 7 + 13 + 35 + 7 = 97$

Identificación del modelo

Si el modelo teórico está relacionado conforme con el fenómeno que se desea estudiar a juicio del investigador, se procede a su identificación con el fin de asegurar que se puedan estimar los parámetros del modelo. Un modelo está identificado si todos los parámetros lo están, es decir, si hay una solución para cada uno de los parámetros.

Un modelo es *identificado* si cuenta con cero grados de libertad (GL), lo que corresponde a un ajuste perfecto del modelo. Esta solución no tiene interés, puesto que no se pueden generalizar los resultados del estudio.

Un modelo es *sobreidentificado* si consta de más información en la matriz de datos que el número de parámetros a estimar, corresponde a un valor positivo de grados de libertad. Este es el ideal de todos los SEM, dado que se puede disponer de más información que parámetros a resolver y obtener el mayor número de grados de libertad posible. Al igual que otras técnicas multivariantes, el investigador se esfuerza por conseguir un ajuste aceptable con el mayor grado de libertad posible. Esto garantiza que el modelo sea fácilmente generalizado.

Un modelo *subestimado* tiene grados de libertad en negativo. Se busca estimar más parámetros de los que se pueden con la información disponible. Para la identificación del modelo de esta investigación, se calculan los grados de libertad con la siguiente fórmula:

NVO: Número de variables observadas: 35

NPE: Número de parámetros a estimar: 97

$$GL = [(NVO \times (NVO + 1)) / 2] - NPE = [(35 \times (35 + 1)) / 2] - 97 = 533$$

- Resultado de la identificación del modelo

El modelo cuenta con 533 grados de libertad. Este resultado muestra un modelo sobreidentificado, lo que significa que existe más información que parámetros a estimar (son 97 parámetros para estimar) y, en consecuencia, el modelo puede ser estimado y contrastado.

- Consideraciones del resultado de la identificación del modelo

Un modelo con más grados de libertad es parsimonioso; esto quiere decir que se ajusta bien a los datos, de esta manera el investigador puede demostrar que las asociaciones entre atributos y FM son importantes. El SEM para esta investigación es un modelo parsimonioso.

- Validez de la información para los factores de madurez

Es importante verificar la validez de las variables del modelo para interpretarlo posteriormente. No es conveniente interpretar el modelo hasta que no

se verifique su validez. Primero se debe asegurar que las variables sean válidas y confirmar así que el modelo es válido. En este caso, el análisis de la validez de los atributos se llevó a cabo con base en la Tabla 4.4 (es la misma Tabla A4.1.4 del Anexo 4.3). Estos índices se validaron de acuerdo con la interpretación detallada en el Anexo 4.3 para la validez de los FM del SEM. Los elementos de referencia para verificar el ajuste de los FM de la Tabla 4.4 se presentan a continuación:

R-Squared	$\geq 20\%$
Cronbach's Alpha	$\geq 0,7$, el criterio relajado es para Composite Reliability $\geq 0,8$
AVE	$\geq 0,5$
VIF	$\leq 3,3$
Q-squared	$> 0,0$
Skewness	$\leq 3,0$
Kurtosis	$\leq 5,0$, un criterio más relajado es ≤ 10

En la Tabla 4.4 se verifica que todos los indicadores presentados demuestran la validez de la información de los FM. Y ninguno de los indicadores sobrepasa los rangos de aceptación de la validez de los FM.

**Tabla 4.4. Estadísticos del SEM. Software WarpPLS 6.0.
Coeficientes de los factores de madurez**

Estadístico	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
R-Squared	0,539	0,469		0,890	0,311	0,522	0,706
Adj. R-Squared	0,530	0,459		0,887	0,305	0,513	0,698
Composite realib.	0,862	0,774	0,838	0,888	0,814	0,903	0,871
Cronbach's Alpha	0,799	0,563	0,738	0,848	0,693	0,873	0,822
Avg. Var. Extract.	0,555	0,534	0,568	0,572	0,525	0,573	0,530
Full collin. VIF	1,975	2,402	3,305	4,103	2,358	2,737	4,298
Q-squared	0,542	0,476		0,654	0,316	0,518	0,707
Min	-5,380	-3,334	-3,652	-3,680	-3,885	-3,544	-3,902
Max	1,271	1,529	1,400	1,760	1,492	1,532	1,449

Estadístico	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
Median	0,208	0,265	0,069	0,227	0,299	0,170	0,169
Mode	1,271	0,365	1,070	0,021	0,770	-0,193	-0,328
Skewness	-2,154	-1,075	-0,940	-1,044	-1,487	-0,991	-1,353
Exc. Kurtosis	8,051	1,842	0,915	1,738	2,438	0,846	2,258
Unimodal – RS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Unimodal – KMW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Normal – JB	No	No	No	No	No	No	No
Normal – RJB	No	No	No	No	No	No	No

Fuente: elaboración propia.

Evaluación del ajuste del modelo. Prueba de robustez

Una vez se ha validado la información de los FM de manera individual, se valida el modelo general; esto se realiza con ayuda de los indicadores mostrados en la Tabla 4.5. Para interpretar los resultados del SEM se analizan cuidadosamente varias pruebas estadísticas y un conjunto de índices para determinar que la estructura teórica propuesta suministra un buen ajuste a los datos empíricos. Este ajuste se verifica si los valores de los parámetros estimados reproducen tan estrechamente como sea posible la matriz observada de covarianza (Kahn, 2006); esto corresponde a la prueba de robustez del modelo para realizar la inferencia.

- Índices de ajuste y calidad del modelo

Con el propósito de medir la eficiencia del SEM, se usa el análisis general de resultados mostrado por el *software* WarpPLS. El modelo obtenido, a juicio de la investigadora, representa el fenómeno o constructo general, la madurez, y cuenta con el mejor ajuste respecto a otros modelos estudiados. El modelo aceptado se presenta en la Figura 4.6. Los resultados para este modelo se presentan en la Tabla 4.5.

La calidad del modelo, conformado por los FM y sus relaciones, se identifica con ayuda de un grupo de indicadores con los cuales se conoce el nivel de ajuste a los datos obtenidos de los expertos. Estos son diez indicadores del desempeño del modelo cuyos criterios de aceptación se explican en el Anexo 4.4. Es importante notar que los indicadores cuentan con un valor

$P < 0,001$, mostrando una significancia de la información obtenida de un mínimo del $1-0,001 = 0,999$, o el 99,9%. Esto quiere decir que, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, se obtiene un nivel de confianza de $1 - \alpha = 0,95$, por tanto, para este estudio, cualquier valor P menor que $\alpha = 0,05$ es significativo para el análisis de las relaciones en el modelo. Esto también se verifica con la prueba de hipótesis que se presenta más adelante.

Tabla 4.5. Resultados del desempeño del SEM (Archivo de datos: EModel 111 VAR - Robust Path - V1.prj)

Indicador	Resultado	Criterio de aceptación
Average Path Coefficient (APC)	0,394	$P < 0,001$
Average R-squared (ARS)	0,494	$P < 0,001$
Average Adjusted R-squared (AARS)	0,485	$P < 0,001$
Average Block VIF (AVIF)	1,481	acceptable if ≤ 5 , ideally $\leq 3,3$
Average Full Collinearity VIF (AFVIF)	2,998	acceptable if ≤ 5 , ideally $\leq 3,3$
Tenenhau GoF (GoF)	0,522	small ≥ 0.1 , medium $\geq 0,25$, large $\geq 0,36$
Sympson's Paradox Ratio (SPR)	1,000	acceptable if $\geq 0,7$, ideally = 1
R-squared Contribution Ratio (RSCR)	1,000	acceptable if $\geq 0,9$, ideally = 1
Statistical Suppression Ratio (SSR)	1,000	acceptable if $\geq 0,7$
Nonlinear Bivariate Causality Direction ratio (NLBCDR)	1,000	acceptable if $\geq 0,7$

Fuente: elaboración propia.

Como se puede verificar en la Tabla 4.5, el SEM obtenido presenta un nivel adecuado de ajuste que permite explicar la robustez del modelo mismo.

- Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realiza a todas las relaciones en el SEM, el concepto general es:

La hipótesis nula es:

$H_0: \beta_i = 0$, no existe una relación directa entre las variables latentes.

Y la hipótesis alterna es:

$H_1: \beta_i \neq 0$, existe una relación directa entre las variables latentes.

Para realizar la prueba de hipótesis, se calcula el valor de z . Se requiere el valor de la media poblacional y la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra.

$$z = (x - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$$

Al obtener el valor de z , se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar y se encuentra el valor P . Este valor P se compara con el nivel de significancia α definido, que para este caso es $\alpha = 0,05$, y, al comparar, se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Con valores P menores de $0,05$, no se acepta la hipótesis nula; por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna: “Existe una relación directa y positiva entre las variables latentes”.

- ***Intervalo de confianza***

Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los parámetros de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_i \pm Z * \delta$$

Donde δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$.

Para nivel de significancia $\alpha = 0,05$, se calcula el área de la distribución normal sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0,975$, luego se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar el valor de Z , el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es de $Z_{\alpha/2}$ que es igual a $1,96$.

El límite inferior del intervalo es:

$$LI = \beta_i - 1,96 * \delta$$

El límite superior del intervalo es:

$$LS = \beta_i + 1,96 * \delta$$

Si el intervalo de confianza incluye el cero, se tiene la certeza de que la β_i no es significativa.

En el Anexo 4.5 se presentan las pruebas de hipótesis para todas las relaciones en el SEM.

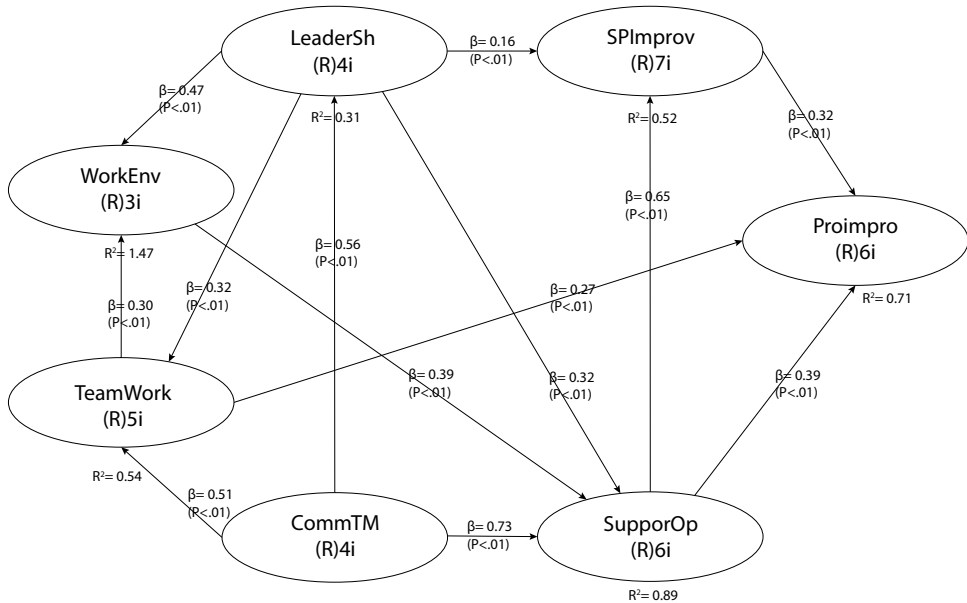


Figura 4.6. Modelo de ecuaciones estructurales para la madurez de LC en la GP.

Fuente: elaboración propia.

Determinación de las ecuaciones estructurales

El modelo de medida está conformado por los atributos que identifican o explican los FM. Los atributos se denotan con X_i y los FM con Y_j . Los FM se denominan también variables endógenas y van ordenadas de menor a mayor según el grado de cercanía con respecto de los atributos, llamados también variables exógenas. Los FM con $Y_j < Y_{j+1}$ influyen en la definición de otros FM, los cuales se explican por los atributos relacionados y la influencia de los FM de los que ellos dependen o, dicho de otra manera, los FM que tienen efecto en ellos. El efecto de los atributos con respecto de los FM se indica por λ_{ji} , esta es la carga factorial (CF). El primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice corresponde al atributo emisor X_i . Con relación a los FM, el efecto entre ellos se muestra con β_{ji} , donde el primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice al FM emisor Y_{j-1} .

Entre los atributos no se consideran efectos; ellos no son causados por ninguna variable que midan directamente, así que la relación que existe entre ellos se expresa por el coeficiente de correlación. Entre ellas solo se presenta covariación, sin que se especifique la fuente de variabilidad. Respecto de los errores, estos se asocian con los atributos y los FM. Los errores asociados a los atributos se representan por δ_i , donde el subíndice corres-

ponde al atributo X_i . De igual manera, ζ_j corresponde al error asociado con el FM Y_j .

Por ejemplo: la ecuación estructural para el FM, CommTM, identificado como Y_1 , viene dada por:

$$Y_1 = \sum \lambda_{1i} X_i + \zeta_1$$

Donde X_i : ($X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$), i corresponde a los atributos que explican al FM Y_1 .

De igual manera, la ecuación para el FM, LeaderSh denominado como el FM Y_2 , se compone de los atributos que lo explican y el efecto directo de Y_1 representado por β_{21} .

$$Y_2 = \sum \lambda_{2i} X_i + \beta_{21} Y_1 + \zeta_2$$

Donde X_i : ($X_{19}, X_{20}, X_{21}, X_{22}$), i corresponde a los atributos que explican al factor Y_2 .

Para los demás FM, cada una de las ecuaciones considera los efectos de los atributos asociados con cada uno de ellos. El efecto directo de los FM causa efectos indirectos en los FM ubicados entre dos y seis segmentos atrás del FM que recibe el efecto. En la siguiente sección, luego de la identificación de las relaciones entre los elementos de madurez, se presentan las ecuaciones estructurales resultantes del SEM.

Expresión matricial de las ecuaciones estructurales del modelo

La notación para las expresiones matemáticas de las ecuaciones estructurales más utilizada es Lisrel¹² y hace uso de letras griegas, las cuales se utilizan en minúscula para desplegar las ecuaciones, y en mayúscula para denotar las matrices (Newsom, 2015).

El SEM se compone de dos modelos, el modelo estructural o interno, o *Inner Model*, y el modelo de medida o externo, u *Outer Model*.

Modelo estructural

El modelo estructural tiene la forma:

$$\eta = \Gamma\xi + B\eta + \zeta$$

¹² Lisrel es el acrónimo de Linear Structural Relations. Es un programa usado en SEM. Desarrollado en la década del 70 por Jöreskog y Dag Sörbom (Jöreskog, 1993), profesores de la Universidad de Upsala, Suecia. Lo distribuye la empresa SSI (Scientific Software International).

Esta forma representa las matrices asociadas, donde:

η : (Eta) Variables latentes endógenas, FM endógenos.

Γ : (Gamma) Se refiere a la matriz $q \times r$ de coeficientes de regresión entre variables latentes exógenas, FM exógenos y variables latentes endógenas, FM endógenos.

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas, FM exógenos.

B : (Beta) Es una matriz de $q \times q$, una matriz de coeficientes de regresión entre variables latentes endógenas, FM endógenos.

ζ : (Zeta) Alteraciones, o errores debidos a las variables endógenas, FM endógenos.

La expresión matricial se desarrolla con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

γ : Trayectoria causal de una variable latente exógena a una variable latente endógena.

β : Trayectoria causal entre variables latentes endógenas.

Matrices de ecuaciones para el modelo estructural

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \times \xi_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{31} & 0 & 0 & \beta_{34} & 0 & 0 \\ \beta_{41} & \beta_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{62} & \beta_{63} & 0 & \beta_{65} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ \zeta_5 \\ \zeta_6 \end{bmatrix}$$

Modelo de medida

El modelo de medida se compone de las variables observadas, o medidas, atributos, relacionadas con las variables latentes exógenas (FM exógenos), y las variables observadas, atributos, relacionadas con las variables latentes endógenas (FM endógenos).

$$\xi = \Lambda_x x + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y y + \epsilon$$

Estas formas representan las matrices para cada una de las relaciones descritas, donde:

X: El resultado de la suma de las cargas factoriales multiplicadas por los atributos x. Esto explica la variable latente exógena (FM exógeno).

Y: El resultado de la suma de las cargas factoriales multiplicadas por los atributos y. Esto explica la variable latente endógena (FM endógeno).

Λx : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, atributos. Los x que explican las variables latentes exógenas (FM exógeno), el ξ .

Λy : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, atributos. Los y que explican las variables latentes endógenas (FM endógeno), el η .

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas (FM exógenos).

η : (Eta) Variables latentes endógenas (FM endógenos).

δ : (Delta) Alteraciones o errores debidos a las variables observadas o medidas x, atributos, relacionadas con la variable latente exógena (FM exógeno).

ϵ : (Épsilon) Alteraciones o errores debidos a las variables observadas o medidas, y atributos, relacionadas con la variable latente endógena (FM endógeno).

Las expresiones matriciales se desarrollan con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

Matrices de ecuaciones para el modelo de medida

FM exógeno - CommTM

$$\xi_1 = [\lambda_{9\ 1} \quad \lambda_{10\ 1} \quad \lambda_{11\ 1} \quad \lambda_{12\ 1}] \begin{bmatrix} x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix}$$

Matrices de ecuaciones para el modelo de medida

FM endógeno - LeaderSh

$$\eta_1 = [\lambda_{19\ 2} \quad \lambda_{20\ 2} \quad \lambda_{21\ 2} \quad \lambda_{22\ 2}] \begin{bmatrix} x_{19} \\ x_{20} \\ x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{19} \\ \epsilon_{20} \\ \epsilon_{21} \\ \epsilon_{22} \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - SupporOp**

$$\eta_2 = [\lambda_{13} \quad \lambda_{23} \quad \lambda_{33} \quad \lambda_{43} \quad \lambda_{53}] \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - TeamWork**

$$\eta_3 = [\lambda_{133} \quad \lambda_{143} \quad \lambda_{153} \quad \lambda_{163} \quad \lambda_{173} \quad \lambda_{183}] \begin{bmatrix} x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \\ x_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{13} \\ \epsilon_{14} \\ \epsilon_{15} \\ \epsilon_{16} \\ \epsilon_{17} \\ \epsilon_{18} \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - WorkEnv**

$$\eta_4 = [\lambda_{64} \quad \lambda_{74} \quad \lambda_{84}] \begin{bmatrix} x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_6 \\ \epsilon_7 \\ \epsilon_8 \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno – SPImprov**

$$\eta_5 = [\lambda_{235} \quad \lambda_{245} \quad \lambda_{255} \quad \lambda_{265} \quad \lambda_{275} \quad \lambda_{285} \quad \lambda_{295}] \begin{bmatrix} x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \\ x_{28} \\ x_{29} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{23} \\ \epsilon_{24} \\ \epsilon_{25} \\ \epsilon_{26} \\ \epsilon_{27} \\ \epsilon_{28} \\ \epsilon_{29} \end{bmatrix}$$

Matrices de ecuaciones para el modelo de medida FM endógeno - ProImpr

$$\eta_6 = [\lambda_{30\ 6} \quad \lambda_{31\ 6} \quad \lambda_{32\ 6} \quad \lambda_{33\ 6} \quad \lambda_{34\ 6} \quad \lambda_{35\ 6}] \begin{bmatrix} x_{30} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{30} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{34} \\ \epsilon_{35} \end{bmatrix}$$

Ensamble de las ecuaciones estructurales en notación Lisrel

El SEM resulta de los modelos de medida y el estructural; sus ecuaciones se agregan para conformar las ecuaciones del modelo, según las siguientes estructuras:

- Modelo de medida

$$\xi = \Lambda_x x + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y y + \epsilon$$

- Modelo estructural

$$\eta = \Gamma\xi + B\eta + \zeta$$

Los atributos se encuentran adecuadamente correlacionados y explican el FM respectivo. Se confirma tanto la validez de los FM con los indicadores del SEM como la validez del SEM; lo cual es el primer paso que lleva a considerar que las relaciones identificadas con este método explican el fenómeno de madurez de LC en la GPC. De igual forma, podrá explicarse cualquier otro fenómeno de madurez en cualquier sector al adaptarlo a partir de su condición de modelo genérico de evolución.

IDENTIFICACIÓN DE LAS RELACIONES DE MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

En esta sección se presentan, a partir de la obtención del SEM, las relaciones entre los elementos que permiten identificar la madurez de LC en la GPC. Las relaciones se establecen entre atributos de madurez, los cuales explican los FM; a su vez los FM se agrupan en un concepto global de madurez representado por el índice global de madurez (IGM), el cual se desarrolla en el

siguiente capítulo. Se analizan las relaciones directas e indirectas obtenidas con el SEM luego de verificar la validez de los atributos, los factores de madurez (FM) y el SEM mismo. El análisis de relaciones ofrece información confiable para la obtención de las ecuaciones estructurales con las cuales se desarrolla el modelo de calificación de madurez (SLC-QM).

El modelo de evolución de LC en la GPC (SLC-EModel) tiene la capacidad de ser aplicado a cualquier proceso de producción o servicios. Lo valioso de este modelo es que se origina en el interés de evaluar la integración de la Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción; sin embargo, como resultado de la investigación se obtiene un modelo con características más generales que le dan las condiciones para ser adaptado a la gestión de otros procesos de producción de bienes y servicios.

En esta sección se describen las relaciones entre los elementos de madurez, de las cuales emerge esa característica genérica que convierte a este en un modelo genérico de valoración y evolución de la madurez que puede ser adaptado a otros sectores y a procesos de producción o servicios. En esta etapa de desarrollo del modelo, se identifican las relaciones entre los atributos (correlaciones), entre los atributos y los FM y entre los FM.

Construcción de los factores de madurez

El SEM desarrollado para esta investigación consolida un modelo genérico por medio del cual se valora la madurez en cualquier proceso de producción o servicios. Resulta muy valioso que, a partir del interés en conocer cómo es el proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC, se pueda adaptar a otro sector. Con ayuda del SEM se identifican las relaciones entre los FM.

Las relaciones directas e indirectas reflejan la influencia y dependencia entre ellos, la fuerza de estas influencias y los efectos que resultan a causa de ellas. Con base en esta estructura se construye el modelo de evaluación de la madurez (SLC-MM), el cual requiere de una herramienta práctica para evaluar en campo el estado de madurez de cada uno de los atributos (SLC-MAET). Esta herramienta se desarrollará con posterioridad a la investigación realizada.

Primero se identifican las relaciones entre los atributos, lo cual permite su agrupamiento en un concepto o constructo, el FM. Posteriormente, se relacionan los FM y se verifica la validez de dichas relaciones.

Relaciones entre los atributos y los factores de madurez

Los FM representan conceptos claves que coinciden con los expresados por expertos consultados en esta investigación y las referencias bibliográficas. La correlación entre los atributos se verifica por medio de un análisis

factorial, técnica que permite describir un conjunto de datos en nuevas variables (o componentes o FM) que están relativamente incorrelacionadas. De esta manera se explica la mayor parte de la variabilidad de cada FM.

Los atributos se agrupan de acuerdo con la cantidad de varianza original que describen, reduciendo la dimensionalidad del conjunto de datos. Los atributos más correlacionados son los que componen el respectivo FM. Las CF se identifican con la letra griega λ , y con subíndices j e i , donde i es el subíndice del atributo X_i y j el subíndice del FM con el que están directamente relacionados, según la CF. En otras palabras, el FM está explicado por los atributos correlacionados.

Por ejemplo, el factor TeamWork, Y_3 , es explicado por cinco atributos (Tabla 4.6), y con las CF λ_{3i} se construyen las ecuaciones estructurales de este nivel.

Tabla 4.6. Cargas factoriales del FM (TeamWork)

Cargas factoriales de los atributos que explican el factor de madurez		
	Atributo X_i	λ_{3i}
LL2	X_1	0,715
PS2	X_2	0,768
TW2	X_3	0,792
TW1	X_4	0,737
LL3	X_5	0,710

TeamWork
 Y_3

Fuente: elaboración propia.

Ecuaciones estructurales de los atributos y el factor de madurez asociado

$$Y_j = \sum \lambda_{ji} * X_i$$

Donde:

Y_j : Factor de madurez j , donde j : (1,7)

λ_{ji} : Carga factorial del atributo X_i asociado al factor de madurez j

X_i : Es el atributo de madurez i , donde i : (1,5)

Estas ecuaciones solo representan de manera independiente, para cada FM, el efecto de los atributos que lo explican. Este efecto corresponde a la suma de los efectos individuales representados por las CF de cada atributo. A continuación, se presentan las ecuaciones estructurales para cada uno de los FM, sin incluir efectos de otros FM:

$$Y_1 = \sum \lambda_{1i} * X_i, \quad \text{Donde } i (9, 10, 11, 12) \quad (1)$$

$$Y_2 = \sum \lambda_{2i} * X_i, \quad \text{Donde } i (19, 20, 21, 22) \quad (2)$$

$$Y_3 = \sum \lambda_{3i} * X_i, \quad \text{Donde } i (1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

$$Y_4 = \sum \lambda_{4i} * X_i, \quad \text{Donde } i (6, 7, 8) \quad (4)$$

$$Y_5 = \sum \lambda_{5i} * X_i, \quad \text{Donde } i (13, 14, 15, 16, 17, 18) \quad (5)$$

$$Y_6 = \sum \lambda_{6i} * X_i, \quad \text{Donde } i (23, 24, 25, 26, 27, 28, 29) \quad (6)$$

$$Y_7 = \sum \lambda_{7i} * X_i, \quad \text{Donde } i (30, 31, 32, 33, 34, 35) \quad (7)$$

Relaciones directas entre los factores de madurez

Una de las principales características del SEM es la capacidad de identificar las relaciones entre los FM que lo componen. Estas relaciones muestran los efectos directos e indirectos entre los FM considerando diferentes rutas y segmentos en cada ruta. Los efectos directos son los más importantes; sin embargo, se pueden presentar efectos indirectos tanto o más relevantes que los directos para los FM que reciben dichos efectos. También se puede identificar el tamaño de esos efectos. Esta magnitud es fundamental para precisar la influencia en los FM de los que se recibe el efecto.

Relaciones directas y tamaño de los efectos

Las relaciones que se confirman con el SEM corresponden con los coeficientes de ruta para los efectos directos. Estos coeficientes de ruta se identifican con la letra griega β y representan los factores de regresión entre los FM. Un coeficiente positivo representa una relación directa y explica que, por cada unidad de cambio en el FM de origen, implica una β unidad de cambio en el FM de llegada. El FM de origen es llamado predictor o regresor, y el FM de llegada se denomina criterio. De otra parte, un coeficiente negativo representa una relación inversa; así, cada unidad de cambio del FM de origen implica una β unidad de cambio inversa en el FM de llegada o criterio.

En la investigación realizada se comprobó que las relaciones entre los FM del modelo en todos los casos son positivas con β positivos, lo que confirma relaciones directas y positivas entre ellos. En la Tabla 4.7, el FM independiente está ubicado en la columna, y el FM dependiente, en la fila, de tal manera que en el cruce de las columnas con las filas se ubican los coeficientes β que indican la “fuerza” o efecto de las relaciones directas entre los FM. Los β_{ji} son los coeficientes con los que se construyen las ecuaciones estructurales.

Tabla 4.7. Coeficientes de ruta β_{ji} . Efecto directo

Coeficientes de ruta β_{ji} . Efecto directo							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,506	0,324					
WorkEnv		0,468	0,295				
SupporOp	0,726	0,322		0,390			
SPImprov		0,159			0,650		
ProImpr			0,272		0,387	0,323	

Fuente: elaboración propia.

Las relaciones directas entre los FM pueden ser consultadas en el Anexo 4.5, así como las otras pruebas de hipótesis, verificando con ellas que todas las relaciones directas y su significancia en la investigación sean válidas. Las ecuaciones debidas a las relaciones directas se presentan a continuación.

Ensamble de las ecuaciones estructurales para efectos directos

Las ecuaciones estructurales para efectos directos son del tipo:

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i + \zeta$$

Donde:

Y_j : Factor de madurez

X_i : Atributo de madurez

β_{ij} : Coeficiente de ruta entre factores de madurez

λ_{ji} : Carga factorial del atributo de madurez

ζ : Error de estimación del factor

$\sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)}$: corresponde a los efectos de las rutas directas que llegan al factor j.

El error corresponde a la estimación de los efectos en el FM. En la investigación, este error no se consideró en razón de que había suficiente información recolectada (Kline, 2011). Esto se fundamenta en que se requería una muestra mínima de noventa respuestas y se obtuvieron 111. En la medida en que la muestra aumenta, este error es más pequeño (García, 2011). Así, las ecuaciones para cada FM con relación a los efectos directos contienen el efecto de los atributos que lo explican y la influencia del FM que lo impactan.

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i,$$

Donde Y_{j-1} : Son los factores de los cuales se recibe el efecto.

$$Y_2 = \beta_{21} Y_1 + \sum \lambda_{2i} X_i, \quad (8)$$

$$Y_3 = \beta_{31} Y_1 + \beta_{32} Y_2 + \sum \lambda_{3i} X_i, \quad (9)$$

$$Y_4 = \beta_{43} Y_3 + \beta_{42} Y_2 + \sum \lambda_{4i} X_i, \quad (10)$$

$$Y_5 = \beta_{51} Y_1 + \beta_{52} Y_2 + \beta_{54} Y_4 + \sum \lambda_{5i} X_i, \quad (11)$$

$$Y_6 = \beta_{62} Y_2 + \beta_{65} Y_5 + \sum \lambda_{6i} X_i, \quad (12)$$

$$Y_7 = \beta_{73} Y_3 + \beta_{75} Y_5 + \beta_{76} Y_6 + \sum \lambda_{7i} X_i \quad (13)$$

Tamaño de los efectos directos para los factores de madurez

La contribución de los FM exógenos en el FM endógeno se expresa con el indicador R^2 . El tamaño del efecto permite evaluar cómo el FM exógeno contribuye en la identificación del FM endógeno como una medida de relevancia predictiva. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo, o la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Este indicador refleja la bondad del ajuste del modelo para explicar la madurez. En el modelo, este indicador se calcula para cada FM dependiente como un resultado del WarpPLS.

Los tamaños de los efectos se leen en el cruce de la columna del FM independiente sobre el FM en el que produce el efecto, como se observa en la Tabla 4.8. La medida del efecto puede mostrar un efecto pequeño con 0,02, mediano para 0,15, o grande para 0,35. Sin embargo, esta escala recomendada por Kock (2017) no establece intervalos para el análisis, por lo cual para la investigación se establecieron los siguientes:

- efectos pequeños entre 0,02 y 0,15
- efectos medianos entre 0,15 y 0,35
- efectos grandes a partir de 0,35

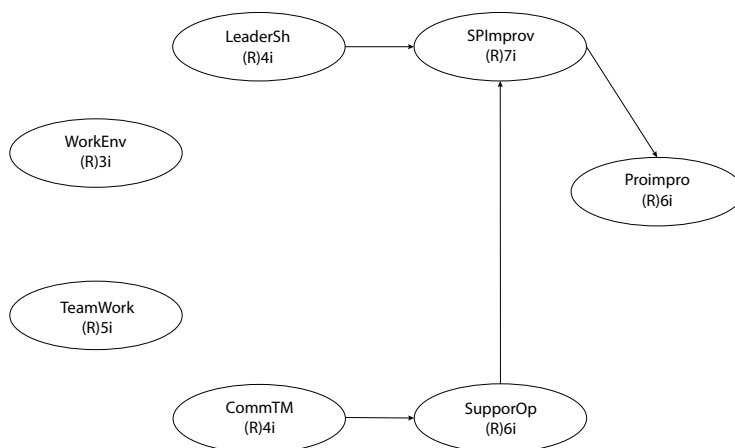
Los efectos de los FM independientes en los FM dependientes, en general, son grandes, en un rango que va desde el 31,1% al 89,0%, como se muestran en la Tabla 4.8 para cada FM.

Se presta particular atención a los efectos grandes (β_i), ya que por medio de ellos se conforma la ruta crítica del modelo. En este caso, la ruta crítica corresponde al compromiso de la alta dirección (CommTM), soporte operativo (SupporOp), mejoramiento del sistema de producción (SPImprov) y mejoramiento de la producción (ProImpr) (ver Figura 4.7).

Tabla 4.8. Tamaño de los efectos directos

Tamaño de los efectos directos								
	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh	0,311							0,311
TeamWork	0,345	0,194						0,539
WorkEnv		0,300	0,169					0,469
SupporOp	0,546	0,119		0,225				0,890
SPImprov		0,063			0,459			0,522
ProImpr			0,172		0,294	0,240		0,706

Fuente: elaboración propia.

**Figura 4.7. Ruta crítica de efectos del modelo. La ruta más influyente.**

Fuente: elaboración propia.

Relaciones indirectas entre los factores de madurez

Los efectos indirectos, en ocasiones, pueden llegar a ser más importantes que los efectos directos. Esto tiene que ver con que las rutas desde un FM exógeno hasta el endógeno influyen en este efecto. Los efectos indirectos en el modelo se presentan entre dos y seis segmentos, los cuales dependen de la cantidad de relaciones que se requieran para llegar desde un FM exógeno al endógeno más alejado.

Todas las rutas que se analizan a continuación hacen referencia a la Figura 4.6 y se pueden consultar en el Anexo 4.5. De igual manera, en el Anexo 4.5 se presenta el análisis de los efectos indirectos, las pruebas de hipótesis, verificando la validez de las relaciones indirectas y la significancia de dichas relaciones.

A continuación, se realiza el análisis de las relaciones y los efectos indirectos para rutas entre dos y seis segmentos.

Efectos indirectos para rutas de dos segmentos y tamaño de los efectos

Se detalla la relación en las rutas de dos segmentos, donde un FM exógeno influye en uno endógeno por esta ruta, tal como se presenta en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Efectos indirectos de dos segmentos

Efectos indirectos de dos segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPIimprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0,181						
WorkEnv	0,410	0,096					
SupporOp	0,179	0,183	0,115				
SPIimprov	0,560	0,209		0,254			
ProImpr	0,419	0,264		0,151	0,210		

Fuente: elaboración propia.

- Tamaño de los efectos indirectos para dos segmentos

El tamaño de los efectos lo producen los FM exógenos en el FM endógeno por las rutas por las que influye un FM en otros. En este caso, el efecto indirecto sobre SPIimprov y ProImpr es tan grande como los efectos directos respectivamente (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos								
	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SPIimprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork	0,123							0,123
WorkEnv	0,207	0,062						0,269
SupporOp	0,135	0,067	0,053					0,255
SPIimprov	0,334	0,082		0,090				0,506
ProImpr	0,317	0,145		0,089	0,160			0,711

Fuente: elaboración propia.

Efectos indirectos para rutas de tres segmentos y tamaño de los efectos

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos según la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Efectos indirectos de tres segmentos

Efectos indirectos de tres segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv	0,053						
SupporOp	0,160	0,037					
SPImprov	0,117	0,119	0,075				
ProImpr	0,299	0,138	0,045	0,082			

Fuente: elaboración propia.

- Tamaño de los efectos indirectos para tres segmentos

En rutas de tres segmentos no hay efectos en TeamWork y LeaderSh (Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos								
	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv	0,027							0,027
SupporOp	0,121	0,014						0,135
SPImprov	0,070	0,047	0,026					0,143
ProImpr	0,227	0,076	0,028	0,048				0,379

Fuente: elaboración propia.

Efectos indirectos para rutas de cuatro segmentos y tamaño de los efectos

Para cada ruta de cuatro segmentos se revisan los efectos según la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Efectos indirectos de cuatro segmentos

Efectos indirectos de cuatro segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							

Efectos indirectos de cuatro segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
SupporOp	0,021						
SPImprov	0,104	0,024					
ProImpr	0,100	0,053	0,024				

Fuente: elaboración propia.

- Tamaño de los efectos indirectos para cuatro segmentos
En rutas de cuatro segmentos no hay efectos en TeamWork, WorkEnv y LeaderSh (Tabla 4.14).

Tabla 4.14. Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos								
	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp	0,016							0,016
SPImprov	0,062	0,010						0,072
ProImpr	0,076	0,029	0,015					0,120

Fuente: elaboración propia.

- Efectos indirectos para rutas de cinco segmentos y tamaño de los efectos**
Para cada ruta de cinco segmentos se revisan los efectos según la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Efectos indirectos de cinco segmentos

Efectos indirectos de cinco segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp							
SPImprov	0,014						
ProImpr	0,042	0,008					

Fuente: elaboración propia.

- Tamaño de los efectos indirectos para cinco segmentos

En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos para cinco segmentos (Tabla 4.16).

Tabla 4.16. Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos								
	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp								
SPImprov	0,008							0,008
ProImpr	0,032	0,004						0,036

Fuente: elaboración propia.

Efectos indirectos para rutas de seis segmentos y tamaño de los efectos

Solo se presenta una ruta de seis segmentos cuyo efecto es muy pequeño (0,004), así como el tamaño del efecto que corresponde a 0,003.

Efectos totales y tamaños de los efectos

Los efectos totales corresponden a los efectos directos más los efectos indirectos. En la Tabla 4.17 se resumen los efectos entre los FM.

Los efectos directos e indirectos actúan de forma conjunta en el FM, con lo cual se obtiene un panorama especial con respecto al tamaño total de los efectos en cada uno de los FM, como se aprecia en la parte inferior de la Tabla 4.17. Para el modelo, los efectos totales son medianos y grandes, excepto los correspondientes a las relaciones TeamWork y SupporOp y TeamWork y SPImprov que corresponden a efectos totales pequeños. De igual manera, para las relaciones indirectas se presenta a continuación un análisis del tamaño de dichos efectos.

Efectos indirectos pequeños

Corresponden a las relaciones indirectas entre LeaderSh y TeamWork 0,096, TeamWork y SPImprov de 0,075 y TeamWork y ProImpr, lo que demuestra que estos efectos no son muy importantes. El efecto entre TeamWork y SupporOp, aunque está en el rango de efectos pequeños, se muestra influyente en SupporOp.

Efectos indirectos medianos

CommTM y TeamWork con 0,181, LeaderSh y SupporOp con 0,220, WorkEnv y SPImprov con 0,254, WorkEnv y ProImpr con 0,233 y SupporOp y ProImpr con 0,210. Todos ellos medianos y cada vez más importantes para el desempeño del modelo.

Efectos indirectos grandes

El efecto del resto de relaciones es grande; por encima de 0,352 que corresponde a LeaderSh y SPImprov. El efecto más grande se produce en la relación que hay entre CommTM y ProImpr de 0,864, efectos muy importantes para el desempeño del modelo.

Efectos moderadores

En este modelo no se presentan acciones para variables moderadoras.

Tabla 4.17. Resumen de los efectos en el modelo

Efectos directos							
Factor endógeno	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,506	0,324					
WorkEnv		0,468	0,295				
SupporOp	0,726	0,322		0,390			
SPImprov		0,159			0,650		
ProImpr			0,272		0,387	0,323	
Suma de los efectos indirectos							
Factor endógeno	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0,181						
WorkEnv	0,464	0,096					
SupporOp	0,361	0,220	0,115				
SPImprov	0,795	0,352	0,075	0,254			
ProImpr	0,864	0,463	0,069	0,233	0,210		

Efectos totales							
Factor endógeno	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,687	0,324					
WorkEnv	0,464	0,564	0,295				
SupporOp	1,087	0,542	0,115	0,390			
SPImprov	0,795	0,511	0,075	0,254	0,650		
ProImpr	0,864	0,463	0,341	0,233	0,597	0,323	

Fuente: elaboración propia.

La mayor cantidad de los efectos directos entre los FM son grandes; solo dos efectos aparecen como medianos. Todos ellos relevantes para entender la lógica de la madurez relacionada con el efecto de unos FM sobre otros para la construcción de artefactos de evaluación y calificación de la madurez de LC en la GPC.

Doce de las quince relaciones indirectas muestran efectos importantes en algunos FM. Esta situación refuerza el hecho de que la influencia de los FM viaja hacia los FM más alejados con un efecto importante, a pesar de estar más de dos segmentos atrás. Esto confirma que este modelo permite visualizar la manera en que se producen estas influencias.

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN SLC-EMODEL

RESUMEN

Este capítulo despliega el desarrollo del modelo de evolución de la madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-EModel). El SLC-EModel se compone de un modelo de madurez (MM) y una estrategia que conduce a una ruta para alcanzar el siguiente nivel de madurez. Con la aplicación del MM se obtienen indicadores con los que se reconoce el nivel de madurez alcanzado por la gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) al integrar a Lean Construction como una estrategia de mejora de la eficiencia del proceso de producción del proyecto. Es importante resaltar que con el propósito de obtener un modelo de evolución de la madurez se desarrolló un modelo con características genéricas que puede ser adaptado para evaluar la madurez de otros procesos de producción de bienes o servicios.

En la primera sección se desarrolla el modelo de madurez (SLC-MM) obtenido de los resultados del modelo de ecuaciones estructurales (SEM) y se presenta la primera parte de la aplicación del modelo a partir de un ejemplo que se complementa en la siguiente sección. En la segunda sección se presenta la estrategia de evolución (SLC-ES), la cual contiene los pasos para su aplicación y para apoyar la toma de decisiones respecto del camino que se debe seguir para avanzar al siguiente nivel de madurez.

ESTRUCTURA DEL MODELO DE EVOLUCIÓN DE MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN (SLC-EMODEL)

El modelo de evolución de la madurez de LC en la GPC (SLC-EModel), o Systemic Lean Construction Evolution Model, se compone de dos artefactos por medio de los cuales se despliegan las acciones de evaluación y evolución. En la Tabla 5.1 se presenta el esquema que representa la estructura del SLC-EModel.

El primer artefacto del SLC-EModel es el modelo de evaluación de madurez de LC en la GPC (SLC-MM), o Systemic Lean Construction Maturity Model, por medio del cual se identifica el nivel de madurez de LC en la GPC. Para realizar esta identificación, el SLC-MM requiere de dos herramientas: la herramienta de evaluación de madurez de los atributos relacionados con la madurez de LC en la GPC (SLC-MAET), o Systemic Lean Construction Maturity Attributes Evaluation Tool, y la herramienta de calificación de madurez (SLC-QT), o Systemic Lean Construction Qualification Tool, por medio de la cual se califica la madurez de los FM y el nivel de madurez de LC en la gestión de producción de proyectos de construcción.

El objetivo de la investigación ha sido la construcción del SLC-EModel, y se alcanzó con el desarrollo de la estructura general del modelo de evolución, y quedó para trabajos futuros el desarrollo de la SLC-MAET, la cual no es del alcance de la investigación realizada. Esta herramienta requiere el detalle de las rúbricas para calificar la madurez de cada atributo. Es así como el aporte de la investigación es la revelación de las relaciones entre los elementos responsables de la madurez y la obtención del modelo de evolución.

El segundo artefacto es la estrategia de evolución de madurez (SLC-ES), o Systemic Lean Construction Evolution Strategy, con la cual se identifica la ruta más apropiada para direccionar las acciones que contribuyan a alcanzar sistemáticamente el siguiente nivel de madurez, tomando como base los resultados del SLC-MM. Este artefacto consta de un procedimiento para seleccionar la configuración de madurez de cada uno de los atributos en el modelo que mejor se ajuste a las capacidades de la organización. Y un procedimiento para obtener el plan maestro de evolución, el cual permite realizar la planificación y el control de su implementación.

Tabla 5.1 Estructura general del SLC-EModel

SLC - EModel			
SLC – MM (Modelo de evaluación de madurez) 3 categorías, 7 Factores de Madurez y 35 Atributos de Madurez		SLC – ES (Estrategia de evolución de madurez)	
SLC – MAET (Herramienta de evaluación)	SLC – QM (Herramienta de calificación)	Definición de la madurez objetivo	Plan de maestro de evolución
C1: Personas	C2: Sistema de producción		Plan de mejoramiento
C3: Organización	ILM (Índice local de madurez)		Plan de acción y seguimiento
	IGM (Índice global de madurez)		
	PERFILES		
	IGM objetivo		
	ILM posibles		
	PERFIL seleccionado		

Fuente: elaboración propia.

MODELO DE MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN (SLC-MM)

En la investigación realizada, la madurez de LC en la GPC es un constructo que se mide de manera indirecta a través siete factores de madurez (FM). Los FM se explican por medio de atributos altamente correlacionados que son medidos directamente en el sistema de producción de proyectos de construcción, con la identificación del nivel de madurez de cada FM, representado por el índice local de madurez (ILMi). A partir del conocimiento de los ILM se puede calificar la madurez de todo el proceso, lo que se lleva a cabo con el índice global de madurez (IGM). Este índice permite conocer el estado de madurez de la GPC al integrar la LC como una estrategia de mejoramiento de la eficiencia de la productividad de la organización de construcción. La obtención del IGM a partir de los ILM corresponde al desarrollo de un constructo de segundo orden que se lleva a cabo por medio del modelo de ecuaciones estructurales (SEM) de segundo orden.

En esta sección se explican conceptos básicos del SEM de segundo orden que son la base para la construcción del IGM y se presenta el proceso para la obtención de cada uno de los ILM_i con los cuales en obtienen el

IGM₀¹³. Este IGM₀ es el indicador que muestra el nivel de madurez de LC en la GPC en su escala original, y que se transforma a una escala para el mejor entendimiento de los niveles de madurez alcanzados. Con los ILM se construyen los perfiles de madurez que explican gráficamente el estado de la madurez del proceso en evaluación. En esta sección se construyen los perfiles de madurez de referencia para cada nivel de madurez del modelo. Estos tres productos, los ILM, el IGM y los perfiles de madurez son insumos para entender el estado actual de la madurez de LC en la GPC, y, a partir de esta información, se propone la estrategia para alcanzar el nivel de madurez objetivo de acuerdo con la disponibilidad de recursos de la organización.

El modelo de madurez de LC en la GPC (SLC-MM) se compone de dos artefactos: una herramienta de evaluación de la madurez (SLC-MAET) y una herramienta de calificación de la madurez (SLC-QT). Para desarrollar el SLC-QT es necesario obtener la formulación para calcular el ILM y el IGM, lo que se presenta en esta sección.

El SLC-EModel, a pesar de haber sido desarrollado con el interés particular de identificar la mejor forma de evolución de la madurez de LC en la GPC, se presenta como un *modelo genérico* que puede ser adaptado para ser aplicado a otras industrias, o a cualquier tipo de proceso de producción de bienes o servicios o del desarrollo de la gestión de proyectos. Cada uno de los elementos en el modelo tiene la capacidad de representar procesos de producción en diferentes industrias, ya que cualquiera de ellas se compone de las personas que forman parte del proceso, el soporte que la organización ofrece para llevar a cabo la producción y el proceso mismo de producción.

Modelos de ecuaciones estructurales de segundo orden

Para obtener el IGM₀ se requiere un análisis factorial de segundo orden, que es el resultado de los FM o variables latentes de primer orden. Los modelos de segundo orden son comúnmente aplicables en contextos de investigación en los cuales los instrumentos de medición evalúan varias construcciones relacionadas; en este caso, la madurez se mide a través de los diferentes FM.

El modelo de segundo orden representa la hipótesis de que “los constructos, aparentemente distintos, están relacionados y se explican por uno o más constructos comunes de orden superior subyacentes” (Zainudin, 2012, p. 163). En comparación con los modelos de primer orden con factores correlacionados, los modelos de segundo orden pueden proporcionar un modelo con altos niveles de ajuste para cada coeficiente o parámetro estimado. Se

¹³ IGM₀: Índice global de madurez obtenido en la escala original a partir de las ecuaciones obtenidas para los ILM.

trata de un modelo más parsimonioso (Salgado, 2009) e interpretable, ya que este factor de orden superior es desarrollado con base en los datos recopilados.

Una variable latente de segundo orden se puede conceptualizar como factores múltiples en un análisis factorial exploratorio que no son particularmente ortogonales. Idealmente, cuando se suman los elementos en cada uno de estos factores, el análisis factorial exploratorio resultante de los elementos analizados es unidimensional. Su representación se realiza en diagramas en que las flechas van desde el IGM hacia los FM, indicando que están correlacionados, no son independientes; esto corresponde a una relación reflectiva. En la Figura 5.1 se presenta la construcción del IGM_o, y, en la Tabla 5.2, los valores de las cargas factoriales para cada uno de los ILM con los que se construye dicho índice global.

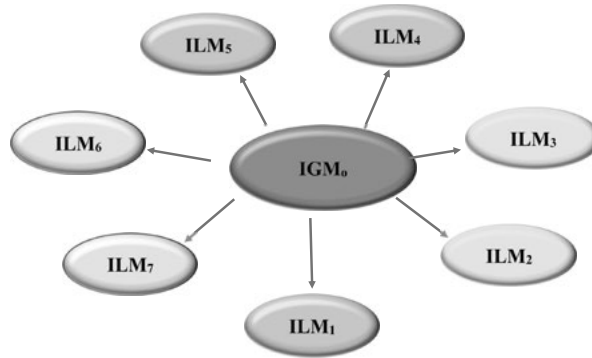


Figura 5.1. Esquema general de la construcción del IGM.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.2 Cargas factoriales de los factores de madurez que componen el índice global de madurez

Factor de madurez	Carga factorial	Carga factorial transformada
CommTM Y ₁	0,797	0,154
LeaderSh Y ₂	0,697	0,134
TeamWork Y ₃	0,631	0,122
WorkEnv Y ₄	0,735	0,142
SupporOp Y ₅	0,782	0,151
SPImprov Y ₆	0,687	0,132
ProImpr Y ₇	0,857	0,165

Fuente: elaboración propia.

Autores como Dwyer y Oh (1987) sugieren que se puede usar una variable latente de segundo orden para combinar efectivamente varias variables latentes de primer orden y así simplificar un modelo en SEM. En su trabajo, Anderson y Gerbing (1984) y Rindskopf y Rose (1988) también sugieren que el principal uso de un modelo de segundo orden es simplificar un modelo combinando variables latentes de primer orden en una sola variable latente de segundo orden, lo cual es conveniente para explicar el fenómeno principal. Para entender un fenómeno como la madurez de LC en la GPC, conviene conocer el comportamiento de los FM de manera individual para entender su impacto en la madurez global.

El SEM permite aprovechar el uso de las regresiones entre elementos del modelo, una cualidad que provee al modelo el análisis multivariado. Respecto de este uso, Dwyer y Oh(1987) explican que una variable latente de segundo orden, el IGM_o , “impulsa” a sus variables latentes de primer orden, los FM, los cuales “controlan” sus variables observadas, los atributos. De esta manera, el modelo permite identificar la influencia que cada atributo tiene en la obtención del IGM_o .

Así que, una vez se conoce el IGM, el tomador de decisiones establece un IGM objetivo, el cual puede ser alcanzado con base en diferentes combinaciones de los 35 atributos del modelo, a partir de la madurez de cada atributo evaluado. El tomador de decisiones selecciona la configuración que más convenga a la organización respecto de estas combinaciones; esto define el plan de evolución. Con el IGM objetivo se desciende en la jerarquía del modelo para identificar los valores para cada ILM y los niveles de madurez en cada atributo que corresponden de la manera más eficiente, según las condiciones de la organización.

Validación del modelo de segundo orden

Esta investigación dispone de un modelo robusto, de acuerdo con los indicadores de ajustes del modelo de segundo orden presentado en la Figura 5.2, lo cual permite afirmar que el IGM representa el proceso de madurez de LC en la GPC de manera muy precisa.

El Alfa de Cronbach muestra que los FM están correlacionados de manera adecuada; este indicador es válido cuando es superior o igual a 0,7. En este sentido, explica que no se presentan FM que estén midiendo la misma condición de madurez, por lo que cada FM mide su madurez de manera precisa. La varianza promedio extraída (AVE) explica la madurez en este valor, 55,4%, lo cual, para este tipo de investigaciones con valores por encima del 20%, es un buen indicador del desempeño del modelo. La Figura 5.2 muestra la manera como se distribuye la información que compone el IGM

con una asimetría de -0,509 que explica que la distribución de la minoría de los datos está en la parte izquierda de la media, y la curtosis con 0,083 que explica una distribución platicúrtica de datos. Este indicador muestra una baja concentración de datos en la región central de la distribución sin que esto implique una menor varianza.

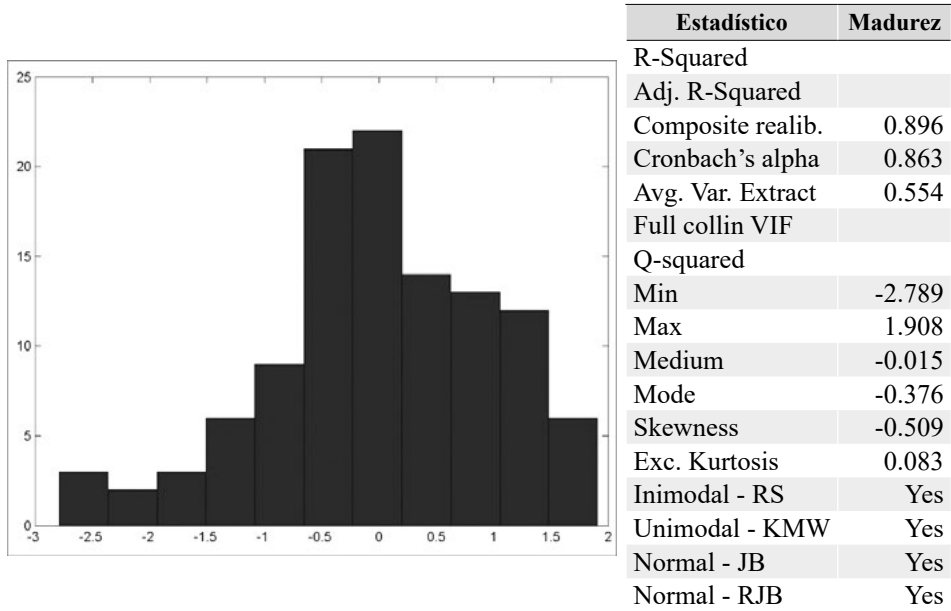


Figura 5.2. Indicadores de ajuste del SEM de segundo orden.

Fuente: elaboración propia.

Herramienta de calificación de la madurez de Lean Construction en la gestión de producción proyectos de construcción (SLC-QT)

La herramienta de calificación de la madurez de LC en la GPC (SLC-QT) se utiliza para identificar el nivel de madurez que alcanza la GPC. Se desarrolla a partir de las ecuaciones del SEM con la ayuda de un modelo estadístico, con el cual se obtienen las ecuaciones en las que se introduce la evaluación de madurez de los atributos para calcular el valor de los ILM y el IGM_o. El nivel de madurez de los atributos se evalúa en campo con ayuda de un estándar, o herramienta de evaluación prevista para tal fin, de tal manera que al multiplicar cada atributo por su carga factorial entrega una calificación para el FM. La calificación para cada FM así obtenida tendrá valores en diferentes escalas, lo cual no ofrece un resultado consistente, por lo que es necesario el desarrollo de un modelo estadístico con el cual se busca que cada FM se halle en la misma escala de calificación. Para calcular los ILM

y el IGM se ha desarrollado una aplicación en una hoja de cálculo con la que se obtiene la información base de análisis para proponer la estrategia de evolución.

Cálculo de los índices locales de madurez (ILM)

En el proceso de producción de proyectos de construcción, la madurez corresponde a un concepto que no se puede medir directamente desde el punto de vista metodológico, de modo que, como característica medible, puede ser evaluada a través de una variable latente, el IGM_o , que se aproxima como una variable sintética. De acuerdo con Silva (1997), una variable sintética es una función de un conjunto de variables intermedias, los FM, donde cada una contribuye a cuantificar algún rasgo del concepto cuya magnitud quiere sintetizarse. La expresión numérica de la madurez de LC en la GPC puede ser modelizada mediante una escala construida a partir de la medición de las siete variables latentes o FM del SEM. Estos FM son medidos mediante una serie de atributos. Los FM son:

- compromiso de la alta dirección
- liderazgo Lean
- trabajo en equipo
- ambiente de trabajo
- soporte operativo a la producción
- mejoramiento del sistema de producción
- mejoramiento de la producción

Una vez seleccionado el índice más apropiado, según el modelo estadístico mencionado, se obtienen las ecuaciones para cada uno de los ILM y para el IGM_o . Las ecuaciones de los ILM incluyen los efectos de los atributos que los explican y los efectos debidos a las relaciones de los FM de los que dependen.

En este apartado se presenta el desarrollo de las ecuaciones, y más adelante, por medio de un ejemplo, se simula una calificación factible, de acuerdo con la información estadística obtenida, para una evaluación de atributos. Con estos resultados se obtienen los ILM, el IGM_o que luego se transforma a la escala entre 1 y 5, y el perfil de la evaluación. Este ejemplo se continúa en la siguiente sección para explicar cómo se desarrolla la estrategia de evolución.

Índices locales de madurez (ILM)

Un ILM_i representa el nivel de madurez alcanzado por el FM al considerar las relaciones directas que recibe de los FM con los cuales está asociado

directamente. Estos índices consideran las relaciones directas e indirectas entre los FM. En estas ecuaciones, la primera parte de la expresión corresponde a la contribución a la madurez del FM de sus respectivos atributos (x_j), y la segunda parte corresponde a la relación directa e indirecta de otros FM.

- Índice de madurez del factor compromiso de la alta dirección (ILM_1)

El ILM_1 es el indicador de madurez del factor compromiso de la alta dirección. En el SEM, este factor ha sido mencionado como CommTM a lo largo de la investigación, y corresponde al FM independiente Y_1 . Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que lo explican; estos son:

X_9 : Apoyo continuo para el desarrollo de un sistema de producción Lean Construction.

X_{10} : Definición y despliegue de la política y la estrategia para apoyar la construcción Lean.

X_{11} : Enfoque en la filosofía.

X_{12} : Resultados del negocio.

$$ILM_1 = Y_{commTM} = Y_1$$

$$ILM_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12}$$

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X_9 , X_{10} , X_{11} , X_{12} . No recibe influencia de ningún otro FM; este es el factor de madurez independiente. El resultado corresponde al IML para el factor de madurez compromiso de la alta dirección.

- Índice de madurez del factor liderazgo Lean (ILM_2)

El ILM_2 es el indicador de madurez del factor liderazgo Lean. En el SEM, este factor ha sido mencionado como LeaderSh, y corresponde al FM dependiente Y_2 . Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor; estos son:

X_{19} : Formación en la filosofía LC.

X_{20} : Cultura Lean.

X_{21} : Crecimiento y desarrollo de líderes Lean.

X_{22} : Valores y visión personal.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X_{19} , X_{20} , X_{21} , X_{22} y de la influencia que recibe

del ILM_1 (CommTM). El resultado corresponde al IML para el factor de madurez Liderazgo Lean.

$$ILM_2 = Y_{leaderSh} = Y_2$$

$$ILM_2 = (0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22}) + (0,104 * ILM_1)$$

Donde,

$$ILM_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12}$$

- Índice de madurez del factor trabajo en equipo (ILM_3)

El ILM_3 es el indicador de madurez del factor trabajo en equipo. En el SEM, este factor ha sido mencionado como TeamWork, y corresponde al FM dependiente Y_3 . Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor; estos son:

X_1 : Procesos de trabajo en equipo.

X_2 : Solución de problemas y aprendizaje continuo.

X_3 : Desarrollo de los equipos de trabajo.

X_4 : Promoción de la mejora continua.

X_5 : Promoción y desarrollo de Lean Construction.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X_1 , X_2 , X_3 , X_4 y X_5 y de la influencia que recibe del ILM_1 y el ILM_2 (CommTM y LeaderSh). El resultado corresponde al IML para Trabajo en equipo.

$$ILM_3 = Y_{TeamWork} = Y_3$$

$$ILM_3 = (0,192 * x_1 + 0,206 * x_2 + 0,213 * x_3 + 0,198 * x_4 + 0,191 * x_5) + (0,095 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2)$$

Donde,

$$ILM_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12}$$

$$ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

- Índice de madurez del factor ambiente de trabajo (ILM_4)

El ILM_4 es el indicador de madurez del factor ambiente de trabajo. En el SEM, este factor ha sido mencionado como WorkEnv y corresponde al FM dependiente Y_4 . Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor; estos son:

X_6 : Participación de las personas en la construcción del ambiente de trabajo.

X_7 : Interacción en el entorno de trabajo.

X_8 : Aprendizaje y entrenamiento para la seguridad en el sitio de trabajo.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X_6 , X_7 y X_8 , y de la influencia que recibe del ILM_2 y el ILM_3 (LeaderSh y TeamWork). El resultado corresponde al IML para ambiente de trabajo.

$$ILM_4 = Y_{WorkEnv} = Y_4$$

$$ILM_4 = (0,337 * x_6 + 0,332 * x_7 + 0,331 * x_8) + (0,087 * ILM_2 + 0,056 * ILM_3)$$

Donde,

$$ILM_3 = 0,192 * x_1 + 0,206 * x_2 + 0,213 * x_3 + 0,198 * x_4 + 0,191 * x_5 + (0,095 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2)$$

$$ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

- Índice de madurez del factor soporte operativo de la producción (ILM_5)

El ILM_5 es el indicador de madurez del factor soporte operativo de la producción. En el SEM, este factor ha sido mencionado como SupporOp y corresponde al FM dependiente Y_5 . Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor; estos son:

X_{13} : Sistemas de información.

X_{14} : Operaciones logísticas.

X_{15} : Proceso de gestión contractual.

X_{16} : Implementación de un sistema de gestión.

X_{17} : Gestión del conocimiento.

X_{18} : Apoyo al proyecto con los procesos de organización.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X_{13} , X_{14} , X_{15} , X_{16} , X_{17} , y X_{18} , y de la influencia

que recibe del ILM_1 , el ILM_2 y el ILM_4 (CommTM, LeaderSh y TeamWork). El resultado corresponde al IML para soporte operativo de la producción.

$$ILML_5 = Y_{SupporOp} = Y_5$$

$$ILML_5 = \left(\begin{array}{l} 0,160 * x_{13} + 0,180 * x_{14} + 0,171 * x_{15} \\ +0,161 * x_{16} + 0,184 * x_{17} + 0,144 * x_{18} \end{array} \right)$$

$$+(0,136 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2 + 0,072 * ILM_4)$$

Donde,

$$ILM_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12}$$

$$ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

$$ILM_4 = 0,337 * x_6 + 0,332 * x_7 + 0,331 * x_8 + 0,056 * ILM_3 + 0,087 * ILM_2$$

- Índice de madurez del factor mejoramiento del sistema de producción (ILM_6)

El ILM_6 es el indicador de madurez del factor mejoramiento del sistema de producción. En el SEM, este factor ha sido mencionado como SPIImprov y corresponde al FM dependiente Y_6 . Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor; estos son:

- X_{23} : Flexibilidad.
- X_{24} : Reducción del tiempo de ciclo.
- X_{25} : Reducción de la variabilidad.
- X_{26} : Control del proceso completo.
- X_{27} : Simplificación de procesos.
- X_{28} : Transparencia.
- X_{29} : *Benchmarking*.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X_{23} , X_{24} , X_{25} , X_{26} , X_{27} , X_{28} y X_{29} , y de la influencia que recibe del ILM_2 y el ILM_5 (LeaderSh y SupporOp). El resultado corresponde al IML para mejoramiento del sistema de producción.

$$ILM_6 = Y_{SPIImprov} = Y_6$$

$$ILM_6 = \left(\begin{array}{l} 0,157 * x_{23} + 0,152 * x_{24} + 0,152 * x_{25} + 0,148 * x_{26} + 0,143 * x_{27} \\ +0,134 * x_{28} + 0,114 * x_{29} \end{array} \right)$$

$$+(0,030 * ILM_2 + 0,121 * ILM_5)$$

Donde,

$$ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

$$ILM_5 = 0,160 * x_{13} + 0,180 * x_{14} + 0,171 * x_{15} + 0,161 * x_{16} + 0,184 * x_{17} \\ + 0,144 * x_{18} + 0,059 * ILM_2 + 0,072 * ILM_4 + 0,136 * ILM_1$$

- Índice de madurez del factor mejoramiento de la producción (ILM₇)

El ILM₇ es el indicador de madurez del factor mejoramiento de la producción. En el SEM, este factor ha sido mencionado como ProImpr y corresponde al factor más dependiente de todos, Y₇. Este factor recibe todos los efectos de los otros factores de madurez. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor; estos son:

X₃₀: Desarrollo de estándares.

X₃₁: Conocimiento y selección de herramientas Lean Construction.

X₃₂: Flujo continuo.

X₃₃: Cumplimiento de la oferta de valor.

X₃₄: Desarrollo de un sistema *pull*.

X₃₅: Mejoramiento continuo.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₃₀, X₃₁, X₃₂, X₃₃, X₃₄ y X₃₅, y de la influencia que recibe del ILM₃, el ILM₅ y el ILM₆ (TeamWork, SupporOp y SPImprov). El resultado corresponde al IML para mejoramiento de la producción.

$$ILM_7 = Y_{ProImpro} = Y_7 \\ ILM_7 = \left(0,175 * x_{30} + 0,170 * x_{31} + 0,169 * x_{32} + 0,168 * x_{33} \right) \\ + 0,161 * x_{34} + 0,157 * x_{35} \\ + (0,050 * ILM_3 + 0,072 * ILM_5 + 0,059 * ILM_6)$$

Donde,

$$ILM_3 = 0,192 * x_1 + 0,206 * x_2 + 0,213 * x_3 + 0,198 * x_4 + 0,191 * x_5 + \\ (0,095 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2)$$

$$ILM_5 = 0,160 * x_{13} + 0,180 * x_{14} + 0,171 * x_{15} + 0,161 * x_{16} + 0,184 * x_{17} \\ + 0,144 * x_{18} + 0,059 * ILM_2 + 0,072 * ILM_4 + 0,136 * ILM_1$$

$$ILM_6 = \left(0,157 * x_{23} + 0,152 * x_{24} + 0,152 * x_{25} + 0,148 * x_{26} + 0,143 * x_{27} \right) \\ + 0,134 * x_{28} + 0,114 * x_{29} \\ + (0,030 * ILM_2 + 0,121 * ILM_5)$$

Con estos ILM se construye el IGM. La obtención de este índice se explica a continuación.

Cálculo del índice global de madurez (IGM)

Un IGM representa el nivel de madurez alcanzado por el proceso de gestión de producción de proyectos de construcción al implementar LC. Este indicador se construye a partir de los ILM. A continuación, se presenta la formulación del IGM de acuerdo con su desarrollo a partir del SEM de segundo orden, como se explicó al inicio de esta sección. En el apartado “Estructura del modelo de evolución de madurez de Lean Construction en la gestión de proyectos de construcción (SLC-EModel)” (Tabla 5.2, pág. 205) se presentan las cargas factoriales correspondientes al SEM de segundo orden con el cual se calcula el IGM. Estas cargas factoriales también han sido objeto de transformación con ayuda del modelo estadístico. Las cargas factoriales se convierten en los coeficientes del IGM, los cuales se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Cargas factoriales de los factores de madurez que componen el índice global de madurez (IGM)

Factor de madurez		Carga factorial	Carga factorial normalizada	Contribución al IGM (%)
CommTM	Y ₁	0,797	0,154	15,40
LeaderSh	Y ₂	0,697	0,134	13,40
TeamWork	Y ₃	0,631	0,122	12,20
WorkEnv	Y ₄	0,735	0,142	14,20
SupporOp	Y ₅	0,782	0,151	15,10
SPImprov	Y ₆	0,687	0,132	13,20
ProImpr	Y ₇	0,857	0,165	16,50

Fuente: elaboración propia.

Con los aportes de cada uno de los FM se construye el IGM₀. Se denomina IGM₀ debido a que los resultados se obtienen en la escala original de calificación dada por la ecuación a continuación:

Índice global de madurez (IGMo) de LC en la GPC

$$IGM_0 = 0,154 * ILM_1 + 0,134 * ILM_2 + 0,122 * ILM_3 + 0,142 * ILM_4 + 0,151 * ILM_5 + 0,132 * ILM_6 + 0,165 * ILM_7$$

Ajuste del índice por escala

De acuerdo con el modelo estadístico, el IGM_0 toma valores en un rango entre 1,161 y 5,804, estos son los valores mínimo y máximo que puede tomar el índice. Estos valores corresponden respectivamente a un nivel de madurez 1 para todos los atributos evaluados con un alcance de madurez igual a 1, y a un nivel de madurez 5 para todos los atributos evaluados con un alcance de madurez igual a 5. Para niveles de madurez intermedios 2, 3 y 4, que se presentan como niveles de referencia con los que identifican más adelante los perfiles de referencia del nivel de madurez, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 5.4.

Se hace necesario realizar un cambio de la escala del resultado final del IGM_0 , o índice global de madurez en su escala original, a una escala que se encuentre en un rango entre 1 y 5 para un mejor entendimiento por parte del usuario del modelo respecto del nivel de madurez obtenido. Este índice es identificado como $IGM_{(1-5)}$, el cual, para la investigación realizada, se denomina IGM. Para esta transformación, primero se cambia la escala del índice entre 0 y 1, y después se cambia la escala entre 1 y 5 con las ecuaciones a continuación:

$$I_{(0-1)} = \frac{IMG_0 - 1,161}{5,804 - 1,161}$$

$$I_{(1-5)} = \frac{[I_{(0-1)} - 0] * [5 - 1]}{[1 - 0]} + 1$$

Tabla 5.4 Índices locales de madurez de referencia para niveles de madurez entre 1 y 5

Nivel de madurez de referencia	ILM ₁	ILM ₂	ILM ₃	ILM ₄	ILM ₅	ILM ₆	ILM ₇	IGM ₀	IGM ₍₁₋₅₎
1	1,000	1,105	1,160	1,161	1,285	1,189	1,221	1,161	1,000
2	2,000	2,210	2,320	2,322	2,570	2,377	2,441	2,322	2,000
3	3,000	3,315	3,481	3,483	3,854	3,566	3,662	3,482	3,000
4	4,000	4,420	4,461	4,644	5,139	4,754	4,883	4,643	4,000
5	5,000	5,525	5,801	5,806	6,424	5,943	6,103	5,804	5,000

Fuente: elaboración propia.

Perfiles de madurez

Con los ILM se obtiene el perfil de madurez de la evaluación, que es la interpretación conjunta de los ILM, y se visualizan por medio de diagramas de radar. También se hace necesario disponer de los perfiles de referencia, los cuales corresponden a los ILM de referencia. Estos perfiles de referencia son útiles para establecer la cercanía de una evaluación de madurez con

alguno de ellos y concebir así una adecuada estrategia de avance hacia el siguiente nivel. Con el SLC-EModel se identifica la madurez y se toman decisiones respecto de la manera de avanzar hacia el siguiente nivel de madurez; esto corresponde a la estrategia de evolución que se presenta más adelante. A continuación, se presentan los perfiles de madurez de referencia.

Perfil de referencia del nivel de madurez 1

Los treinta y cinco atributos se evalúan en nivel 1 de madurez. La configuración del perfil de referencia del nivel de madurez 1 corresponde al perfil identificado con el color rojo de la Figura 5.3. Nótese que este perfil no se ciñe a uno en el cual todas las calificaciones en el radar son 1. Esto se debe a la naturaleza sistémica del modelo y la manera como los FM *causa* impactan en los FM *efecto*. Así, el nivel de madurez 1 alcanzado por el FM dependiente es el resultado de un “empuje” provisto por el FM del que recibe efecto de acuerdo con el modelo de relaciones obtenido en el Capítulo 4.

Para este y todos los perfiles de madurez obtenidos con el modelo de madurez, el FM CommTM es el factor independiente del modelo, a la vez que es el FM más influyente, como se vio en el Capítulo 4. El perfil 1 se obtiene evaluando todos los atributos que explican el factor CommTM, con un nivel de madurez 1. De esta manera, el FM califica con un nivel de madurez 1, lo cual es consistente con el hecho de que las evaluaciones para los atributos sean 1. A partir de la calificación de cada FM y el efecto de cada uno de ellos en el modelo, se obtienen las calificaciones para los otros FM. En la Figura 5.3 se aprecia el perfil de referencia nivel de madurez 1.

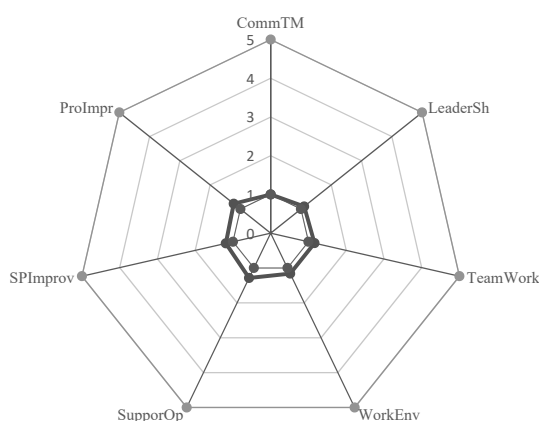


Figura 5.3. Perfil de referencia nivel de madurez 1 de LC en la GPC.

Fuente: elaboración propia.

Perfiles de referencia de los niveles de madurez del 2 al 5

Todos los perfiles guardan proporción entre ellos dada su construcción a partir de las ecuaciones para los ILM. Una vez agrupados los cinco perfiles de referencia, se obtiene un referente para entender el nivel de madurez de LC en la GPC. En la Figura 5.4 se muestran los cinco perfiles de referencia de la evaluación de la madurez de LC en la GPC.

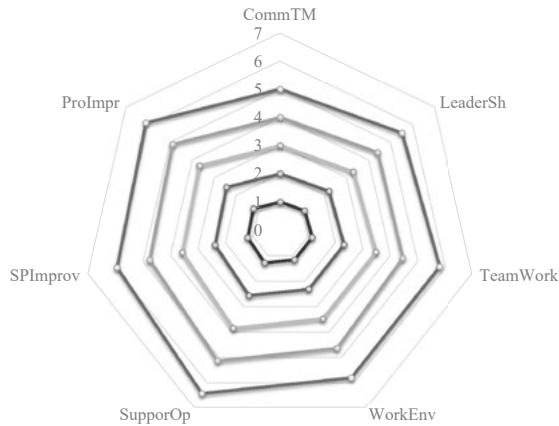


Figura 5.4. Perfiles de referencia nivel de madurez del 1 al 5 de LC en la GPC.

Fuente: elaboración propia.

Herramienta de evaluación de la madurez de los atributos de LC en la GPC (SLC-MAET)

La herramienta de calificación de madurez (SLC-QT) requiere la evaluación de los treinta y cinco atributos del modelo. Esta evaluación se obtiene en campo, para cada uno de los atributos, con ayuda de la herramienta de evaluación de madurez de los atributos (SLC-MAET), que evalúa el alcance de madurez de cada atributo según un estándar que especifica las características de madurez en cada nivel previsto. Este estándar reduce la subjetividad de una evaluación del atributo prescribiendo su alcance entre cinco niveles de madurez.

El desarrollo de la SLC-MAET no es del alcance de la investigación realizada, por lo cual se propone como una investigación futura que se explica en detalle en el apartado correspondiente de este libro. Sin embargo, el presente desarrollo del SLC-EModel considera la importancia y el efecto de cada atributo en la consecución de la madurez. A continuación, y por medio de un ejemplo, se presenta el uso del SLC-EModel y se aborda la evalua-

ción y calificación de madurez. Más adelante, en la sección 5.3.4.2, a partir de los resultados se desarrolla la estrategia de evolución.

Ejemplo de aplicación del Modelo de Madurez (SLC-MM)

Para el desarrollo del ejemplo, se supone una evaluación en campo, con la cual se identifica el nivel de madurez de LC en la GPC para un caso particular. Primero se hace uso de la SLC-MAET, cuyos resultados se reportan en la Tabla 5.5. En esta tabla también se relacionan en la cuarta columna la importancia de cada atributo en la conformación de cada FM. Esta importancia debe leerse de manera independiente por cada FM, los cuales son utilizados para construir la herramienta de calificación (SLC-QT).

La evaluación obtenida para los 35 atributos se ingresa al SLC-QT y se obtienen los ILM que se presentan en la Tabla 5.6. Los cálculos se realizan con la aplicación desarrollada en Excel (identificada como Aplicación SLC-EModel).

Tabla 5.6. Índices locales de madurez de LC en la GPC (ejemplo)

Índices locales de madurez			
Compromiso de la alta dirección	CommTM	IML1	1,277
Liderazgo Lean	LeaderSh	IML2	1,348
Trabajo en equipo	TeamWork	IML3	1,605
Ambiente de trabajo	WorkEnv	IML4	1,538
Soporte operativo a la producción	SupporOp	IML5	1,884
Mejoramiento del sistema de la producción	SPImprov	IML6	1,268
Mejoramiento de la producción	ProImpr	IML7	1,803

Fuente: elaboración propia.

Los IML se representan con diagramas de radar, donde los radios corresponden a cada uno de los atributos del respectivo FM. Estos FM están agrupados según las categorías de madurez a los que pertenecen (Figuras 5.5 a, b y c). En las figuras se identifica con color negro el estado actual de madurez. El color rojo corresponde al nivel de madurez objetivo, que se explica en la sección 5.3.4.2.

Tabla 5.5. Resultados de la evaluación en campo de LC en la GPC (ejemplo)

Reporte SLC-MAET					
Factor de madurez	Atributo	Identificación del atributo	Peso del atributo por FM (Transformado)	Resultados de la evaluación SLC-MAET	Resultados de la selección SLC-ES MAET
TeamWork	LL2	X1	0,192	1	2
	PS2	X2	0,206	2	3
	TW2	X3	0,213	1	2
	TW1	X4	0,198	2	2
	LL3	X5	0,191	1	1
WorkEnv	WE1	X6	0,337	1	2
	WE2	X7	0,332	1	1
	WS2	X8	0,331	2	2
CommTM	HMC1	X9	0,277	2	3
	HMC2	X10	0,278	1	2
	HMC3	X11	0,24	1	2
	IBP1	X12	0,205	1	1
SupporOp	INN2	X13	0,16	2	3
	SCLO2	X14	0,18	3	3
	IBP4	X15	0,171	1	2
	IBP3	X16	0,161	1	2
	CIF1	X17	0,184	1	2
	IBP2	X18	0,144	1	1
LeaderSh	LDC2	X19	0,268	1	2
	A1	X20	0,266	1	2
	LL1	X21	0,253	1	2
	A2	X22	0,214	2	3
SPImprov	PIM2	X23	0,157	1	2
	WI4	X24	0,152	1	1
	WI3	X25	0,152	1	1
	FC3	X26	0,148	1	2
	PIM1	X27	0,143	1	2
	PIM3	X28	0,134	1	1
	PIM4	X29	0,114	1	2
ProImpr	WPS1	X30	0,175	2	3
	TU1	X31	0,17	1	2
	WI1	X32	0,169	2	3
	FC1	X33	0,168	2	2
	PPC2	X34	0,161	1	1
	FC2	X35	0,157	1	2

Fuente: elaboración propia.

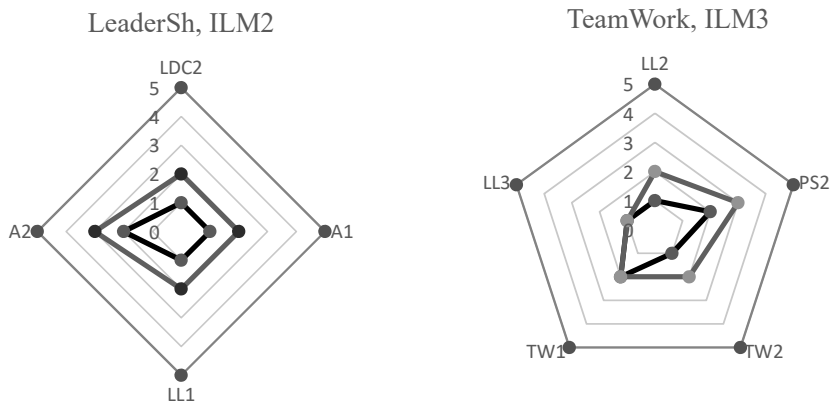


Figura 5.5 a. Perfiles de madurez de los FM de la categoría Personas.

Fuente: elaboración propia.

Evaluación del estado actual de madurez. Perfil propuesto para evolución.

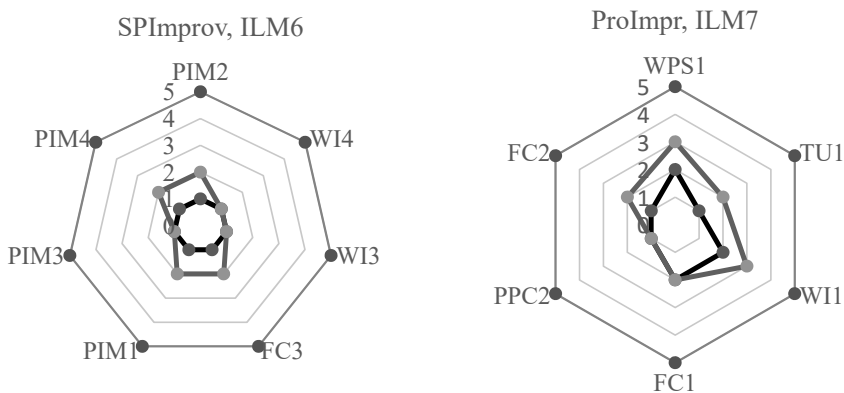


Figura 5.5 b. Perfiles de madurez de los atributos de la categoría Sistema de producción.

Fuente: elaboración propia.

Evaluación del estado actual de madurez. Perfil propuesto para evolución.

Los ILM de esta evaluación de madurez, respecto de los perfiles de referencia, se presentan en la Figura 5.6. Se identifica con color negro el perfil de la evaluación de madurez para el ejemplo, enmarcado en los perfiles de referencia de los niveles de madurez del modelo. El perfil identificado con el color rojo se refiere al nivel de madurez objetivo, el cual se obtiene al analizar las oportunidades reales de mejora para cada atributo, de acuerdo con los recursos de la organización. (Pag. 221).

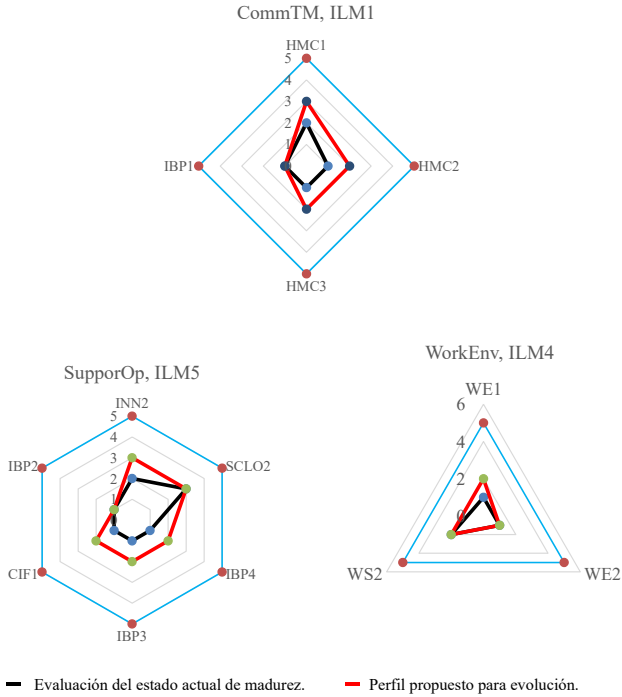


Figura 5.5 c. Perfiles de madurez de los atributos de la categoría Soporte de la organización al proceso de producción.

Fuente: elaboración propia.

Evaluación del estado actual de madurez. Perfil propuesto para evolución.

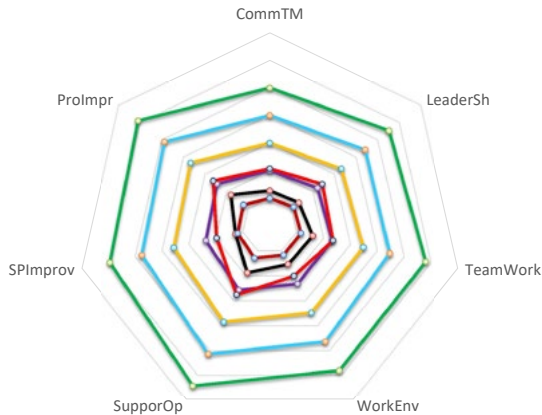


Figura 5.6. Perfil de madurez obtenido para la evaluación de madurez del ejemplo.

Fuente: elaboración propia.

A partir de los ILM se obtiene el IGM, el cual se presenta en la Tabla 5.7. Se consigue primero un IGMo sin ajustar, pues obedece a la información recogida directamente del SLC-QT. Luego se realiza una transformación de escala en un rango entre 0 y 1 y, más adelante, se transforma a una escala entre 1 y 5; de esta manera se obtiene el IGM, el cual resume el nivel de madurez de LC en la GPC; esta es la calificación del estado actual del sistema. Para este ejemplo, el nivel de madurez global es 1,33.

A manera de resumen de esta sección, se destaca que el modelo de madurez de LC en la GPC se compone de dos artefactos o herramientas: la herramienta de evaluación de los atributos (SLC-MAET, Systemic Lean Construction Maturity Attributes Evaluation Tool), y la herramienta de calificación de atributos (SLC-QT, Systemic Lean Construction Qualification Tool) que contiene las ecuaciones desarrolladas para calificar los ILM y el IGM.

Tabla 5.7. IGM de LC en la GPC. Resultado del ejemplo

Índices locales de madurez					
Factor de madurez	Coefficiente de calificación para el IGM	ILMi	IGMo Sin ajustar	IGMo Cambio de escala (0-1)	IGMo Cambio de escala (1-5)
CommTM	0,154	1,277	1,54	0,081804820	1,33
LeaderSh	0,134	1,348			
TeamWork	0,122	1,605			
WorkEnv	0,142	1,538			
SupporOp	0,151	1,884			
SPIImprov	0,132	1,268			
ProImpr	0,165	1,803			

Fuente: elaboración propia.

Se obtienen las ecuaciones para la calificación de la madurez de los FM que se identifica por medio de ILM, y la fórmula para la calificación del IGM. Con estos datos se desarrolla la herramienta de calificación (SLC-QT) y se construyen los perfiles de referencia de la evaluación.

Con los ILM se construye el perfil madurez de la evaluación, el cual se compara con los perfiles de los niveles de referencia de madurez que servirán, junto con los ILM y el IGM, como elementos para establecer la estrategia de evolución.

ESTRATEGIA DE EVOLUCIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN (SLC-ES)

Esta sección contiene el direccionamiento para el desarrollo de la estrategia de evolución de madurez (SLC-ES), o Systemic Lean Construction Maturity Evolution Strategy. Esta estrategia se desarrolla a partir del análisis de la información obtenida con el modelo de madurez (SLC-MM), con la cual la alta dirección puede tomar decisiones precisas respecto de la evolución hacia niveles superiores de madurez. La alta dirección, con apoyo de los equipos involucrados en la evaluación de madurez en los diferentes niveles jerárquicos, direcciona la mejora continua de la producción del proyecto de construcción.

En la sección anterior se obtuvo el SLC-MM que consta de dos herramientas: SLC-MAET y SLC-QT. A partir de los indicadores de madurez se obtienen los ILM y el IGM, así como el perfil de madurez. Con esta información se desarrolla la estrategia de evolución, la cual requiere de varios equipos de trabajo. El SLC-EModel se concibe para apoyar un proceso de autoevaluación de la madurez y, con esta autoevaluación, se construye entre todas las personas de la organización el plan de mejoramiento teniendo en cuenta la estrategia de evolución seleccionada.

Definición de los resultados esperados con la evolución de LC en la GPC y análisis de beneficios

La evaluación de la madurez se presenta como un proceso sistémico que propicia el entendimiento del estado del proceso de producción de proyectos de construcción para buscar un mejor desempeño, el cual se conduce con ayuda de una estrategia de evolución, cuyos resultados se materializan, entre otros, en el mejoramiento de la productividad y el crecimiento en los resultados del negocio. En este sentido, la evolución de la madurez debe ser un proceso que agregue valor a la organización; de tal manera que impulse la eficiencia de la producción y el aumento de la rentabilidad del negocio. De esta forma, antes de definir cualquier estrategia de evolución, la organización debe establecer claramente los resultados esperados de acuerdo con las metas y los objetivos empresariales.

Los procesos de cambio requieren de la motivación, el esfuerzo y la dedicación de cada una de las personas involucradas. La motivación es el elemento que propicia en las personas el impulso para participar; de este modo, si la organización obtiene beneficios de la evolución de su sistema de producción, las personas también deberían percibir esos beneficios de manera individual. De acuerdo con Chiavenato (2008), este es uno de los

principales preceptos que deben ser cumplidos para desarrollar un proceso de evolución de la madurez y garantizar su sostenibilidad.

En la selección de incentivos, lo más importante es el hecho de que estos sean claros. Debe ser claro a quién premiar, de qué manera y por qué logros. Uno de los errores más frecuentes cuando se desarrolla un sistema de incentivos es basar el rendimiento en medidas absolutas, es decir, premiar solo a los que presentan un mejor resultado; sin embargo, estos resultados no se obtienen si no se cuenta con equipos confiables, es decir, los resultados se logran como equipo y no de manera individual (Fisher, 2005).

Estrategia de evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

El SLC-ES es un artefacto diseñado con una estructura similar a la del modelo de evaluación de madurez. En la práctica hace uso de la misma estructura del SLC-MM. Este artefacto permite realizar un proceso de prospección usando el SLC-MM a la inversa de cómo se obtiene la evaluación de madurez LC de la GPC. El SLC-ES consulta las ecuaciones de madurez del SLC-QT con las cuales se calculan los ILM; de esta forma se identifican las exigencias de evolución de madurez para cada uno de los atributos del modelo para alcanzar el objetivo de evolución. En el modelo de evolución, es en el nivel jerárquico de los atributos donde se llevan a cabo las acciones de madurez, ya que su evolución influye en la obtención de más altos ILM que acerquen la evolución al IGM objetivo.

La estrategia de evolución es un proceso que inicia con la definición del objetivo de evolución. Este objetivo implica diversas combinaciones de evolución de madurez al nivel de los atributos, con los cuales se obtienen ILM para cada una de las posibles combinaciones. Se buscan combinaciones de atributos cuyas acciones de evolución estén cercanas al estado de madurez actual, de esta manera se encuentra, entre las combinaciones, el camino más corto y eficiente para llegar al objetivo de evolución propuesto. Esta selección de combinaciones se contrasta con la capacidad de la organización para llevar a cabo la implementación del plan maestro de evolución, y se selecciona finalmente la configuración objetivo de evolución de atributos. En la Figura 5.7 se esquematiza el uso del SLC-ES para definir el índice global de madurez objetivo (IGM_o) a partir de la intervención de los atributos.

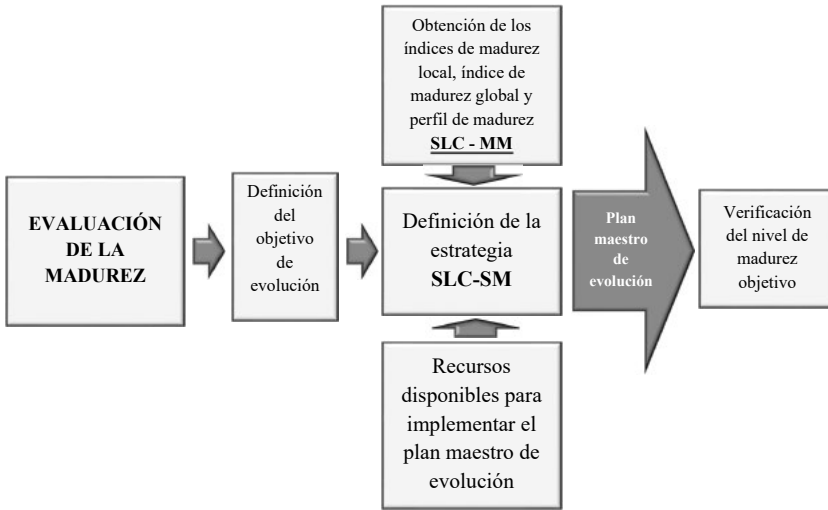


Figura 5.7. Esquema de la aplicación de los componentes del SLC-EModel para la definición e implementación de la estrategia de evolución.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5.8, el SLC-ES requiere de tres entradas: (a) el SEM y los resultados de la evaluación de madurez, (b) la definición del objetivo de evolución y (c) los recursos disponibles por la organización para el desarrollo del plan maestro de evolución. El SLC-ES consulta las diferentes combinaciones de evolución de atributos para decidir cuál de ellas escoger de acuerdo con dos criterios:

1. La cercanía entre el estado actual de madurez y la madurez objetivo, considerando la importancia relativa del atributo en el FM y el efecto de los FM en el modelo.
2. La capacidad de la organización para atender las condiciones de evolución sugeridas por la configuración de niveles de madurez de atributos y FM, y tomar así decisiones respecto de la asignación de recursos a los atributos.

Para identificar el camino más corto y eficiente para alcanzar el objetivo de evolución propuesto, se requiere de la ayuda del modelo de ecuaciones estructurales (SEM). Se debe recordar que con el SEM se conocen con precisión los valores de las contribuciones de los atributos en la explicación de cada FM que ellos componen. De igual manera, se conocen las interacciones de cada FM y, por supuesto, se calculan los valores de los ILM, con lo cual se configuran diversas rutas de efectos y una ruta crítica para la identificación del IGM_o.

De manera práctica, en un proceso de evaluación de madurez con el uso del SLC-MM, se identifica la madurez para cada atributo y se obtienen los ILM y el IGM de dicha evaluación. De igual forma, se determinan las rutas por las cuales se logra el IGM y se identifican los atributos y los FM más influyentes para la obtención de la madurez según la evaluación. Se comparan las rutas obtenidas en el desarrollo del SEM y se selecciona la ruta más cercana a la configuración definida en él. Como se explicó, la selección de la ruta de evolución consulta la capacidad de la organización para asignar recursos, con los cuales se despliega la estrategia de evolución a partir de la mejor combinación de los niveles de madurez que deben alcanzar los atributos.

Equipos para el proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC

La evaluación de madurez es un proceso sistémico en sí mismo, y todas las personas de la organización deben participar con el convencimiento de que la evaluación se trata de una tarea que redundará en el mejoramiento global y que trae beneficios a todos los actores en el proceso de producción de proyectos de construcción. El sistema de evaluación debe disponer de un equipo evaluador de los atributos, un equipo calificador de la madurez, un equipo evaluador del estado actual de la madurez, un equipo de estrategia y un equipo de decisión de la estrategia más apropiada para la evolución.

Los equipos están conformados por las personas de la organización. Estos equipos entienden el estado actual de madurez a través del SLC-MM y proponen las estrategias para que la alta dirección seleccione la que más convenga a sus intereses de acuerdo con el plan maestro de evolución. Este plan se pone en práctica por medio del plan de acción. Los niveles jerárquicos de aplicación se establecen en tres categorías; sin embargo, los equipos del proceso de evolución deben ser constituidos interdisciplinariamente con la participación de todas las categorías de manera sistémica, las cuales integran a las personas, así:

- **Alta dirección:** junta directiva, gerentes, socios, clientes, asesores y otros de acuerdo con este nivel jerárquico y la configuración de la organización.
- **Dirección operativa:** directores de áreas funcionales, personal de las áreas funcionales, proveedores y otros de acuerdo con este nivel jerárquico y la configuración de la organización.
- **Proyecto:** directores de proyectos, directores de fases, profesionales, tecnólogos, técnicos, obreros y otros de acuerdo con este nivel jerárquico y la configuración de la organización.

El equipo de evaluación es muy importante para el éxito de la identificación del estado actual y para desarrollar el plan maestro de evolución. Como se ha explicado, el espíritu de este modelo es que sea utilizado con fines de autoevaluación, en cada una de las fases de desarrollo del proyecto de construcción, por todas las personas involucradas en la GPC. En este sentido, el esquema presentado en la Figura 5.8 muestra las relaciones entre los equipos que apoyan la aplicación del SLC-EModel, las personas que participan de la evaluación y la alta dirección que toma decisiones basadas en su interacción con los equipos. El SLC-MM es el centro de este proceso, pues a partir de la evaluación de madurez se toman las decisiones.

El proceso de autoevaluación debe ser una tarea constante y permanente, realizado a través de rutinas que se integren al quehacer diario. De esta manera, el SLC-EModel debe estar articulado con sistemas de información y sistemas de comunicación que hagan de la evaluación un proceso funcional y práctico. Se trata de un proceso de evaluación sistémico y participativo. En la Figura 5.8 se aprecian los seis equipos que participan en la implementación del SLC-EModel, articulados sistémicamente.

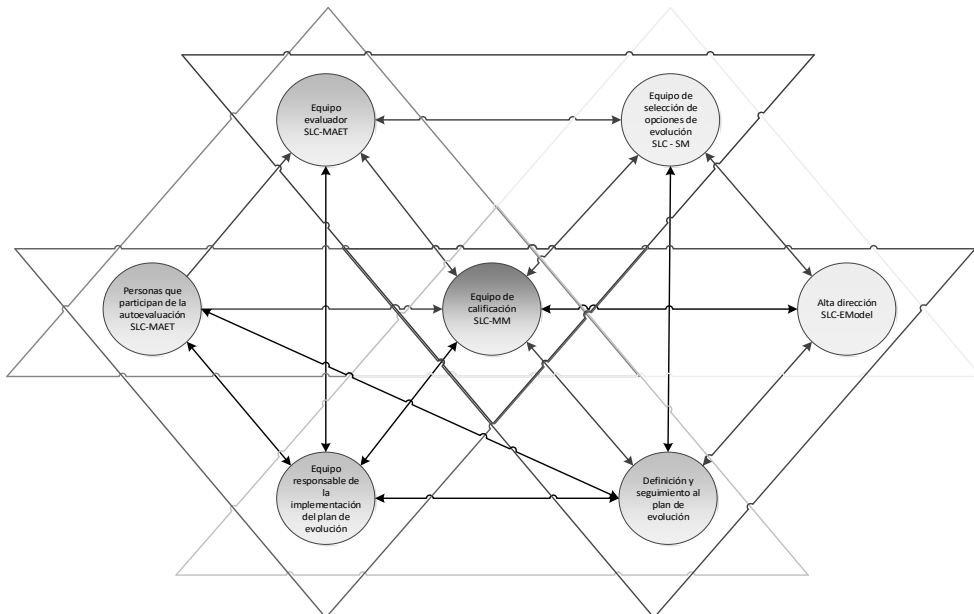


Figura 5.8. Relaciones entre los equipos y la alta dirección para la aplicación del SLC-EModel.

Fuente: elaboración propia.

El elemento articulador de la evolución es el claro entendimiento del estado actual de madurez; información a partir de la cual se toman decisiones y se propone la estrategia de avance al siguiente nivel. Los equipos se agrupan de acuerdo con el alcance de su intervención, según se muestra en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Responsabilidades de los equipos del proceso de evolución de LC en la GPC

Equipos de trabajo	Responsabilidades
Verde	Evaluar la madurez de LC en la GPC.
Rojo	Seleccionar las combinaciones de atributos según el IGM _c objetivo.
Amarillo	Decidir sobre la configuración de evolución de atributos para desarrollar el plan maestro de evolución.
Morado	Definir el plan de evolución.
Azul	Realizar la implementación del plan de evolución.
Naranja	Seguimiento a la implementación del plan de evolución.

Fuente: elaboración propia.

Aplicación del modelo de evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

Al aplicar el SCL-EModel se recomienda hacerlo en tres fases de manera secuencial, siguiendo la jerarquía de los elementos del modelo. Su aplicación va desde el elemento más desagregado (atributos), pasando por los niveles de agregación de FM y categorías, hasta llegar al nivel principal que agrupa todos los elementos en el modelo. La jerarquía se presenta en el esquema de la Figura 5.9, en la que se detalla el FM liderazgo Lean a manera de ejemplo.

Primera fase de aplicación del SLC-EModel

En esta primera fase de aplicación del modelo, se evalúa la madurez de los atributos, se califica la madurez de los FM y la madurez global, se identifican los perfiles de madurez y se realiza el análisis del estado de LC en la GPC.

En esta fase intervienen las personas que participan en la evaluación de los atributos, el equipo evaluador que gestiona y coordina las acciones de evaluación con el SLC-MAET y el equipo de calificación de madurez con el SLC-QT. El producto de esta fase son el IGM, los ILM y el perfil de madurez del proceso en evaluación. En la Figura 5.10 se muestra el diagrama de flujo que sirve de guía para llevar a cabo la aplicación del SLC-EModel en el proceso de esta fase.

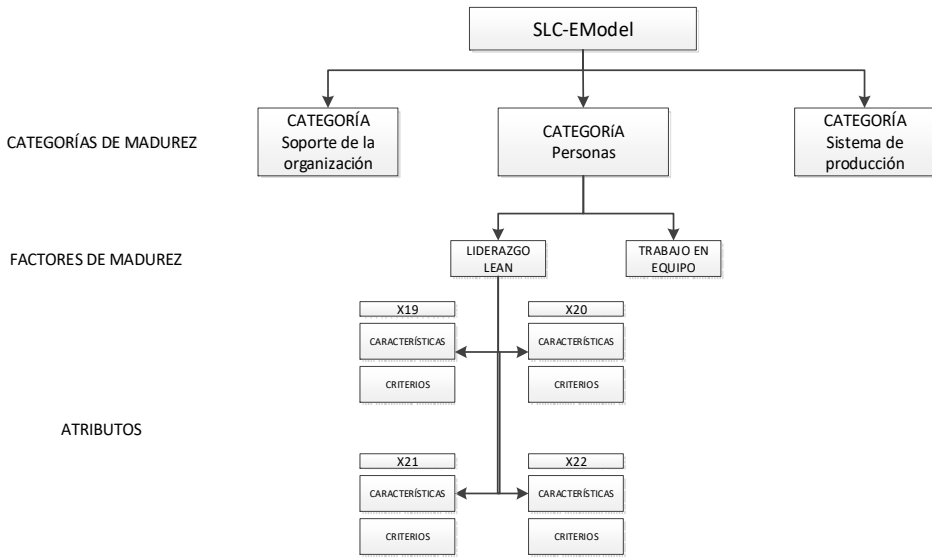


Figura 5.9. Jerarquía de agrupación de los elementos del SLC-EModel.
Fuente: elaboración propia.

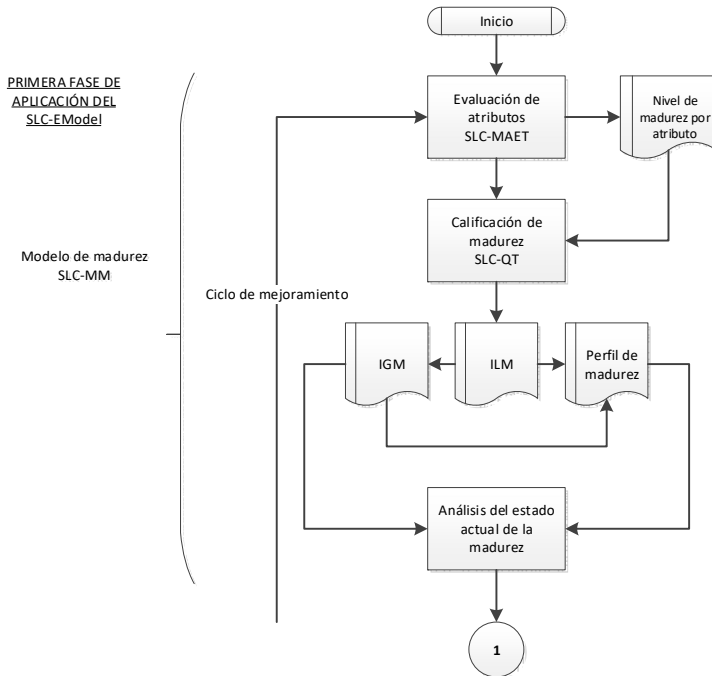


Figura 5.10. Primera fase de aplicación del SLC-EModel. Evaluación de la madurez con SLC-MM.
Fuente: elaboración propia.

- Evaluación de la madurez de los atributos

Se evalúan los atributos de madurez según el alcance de sus características y criterios de valoración definidos en el SLC-MAET para cada una de las fases del proyecto de construcción. El nivel se considera alcanzado si se cumplen todas las características especificadas para las fases del proyecto que sean definidas en ese mismo nivel. El resultado es la identificación del nivel de madurez alcanzado por atributo.

Es importante, para la construcción del plan maestro de evolución, conocer detalles de la evaluación de aquellos atributos que no alcanzan un nivel de madurez específico. Esa transición entre un nivel de madurez a otro, en la investigación realizada, se ha denominado subnivel de madurez de los atributos. Este subnivel hace uso de la habilidad del evaluador para identificar el estado del alcance de la madurez del atributo cuando esta no se reporte completa. Esta es la progresión del alcance de madurez del atributo. Se podrá usar una evaluación de progresión de alcance del nivel para cada atributo en un intervalo que especifique un estado entre *inmaduro* y *casi maduro*.

- *Inmaduro* corresponde a un intervalo entre 0 y 0,5, donde no están incluidos ni el cero ni el 0,5. El cero no se incluye, pues solo se califica cero si se verifica la inexistencia del atributo.
- *Casi maduro* corresponde a un intervalo cerrado a la izquierda, donde está incluido el 0,5 pero no está incluido el 1 (0,5 – 1).

Se advierte que esta evaluación contiene un alto grado de subjetividad por parte del evaluador. Sin embargo, es un indicador de avance del proceso de madurez del atributo que sirve a la evaluación para identificar qué características le faltan al atributo para alcanzar el nivel de madurez más cercano.

- Calificación de la madurez

Con la identificación de los niveles de madurez de cada atributo, se hace uso del SLC-QT para obtener los indicadores resultantes de esta calificación, los ILM y el IGM_o . Esta calificación puede ser obtenida mediante la aplicación desarrollada. La calificación para el IGM_o que resulta de la combinación de los ILM se cambia a una escala entre 1 y 5, con la intención de que el tomador de decisiones tenga una apreciación del nivel de madurez global en términos más fáciles de entender, así se obtiene el IGM. En efecto, es más fácil de entender un nivel de madurez 1 en la escala transformada, que un nivel de madurez 1,16 en la escala original.

- Identificación del perfil de madurez

La agrupación de los ILM en un diagrama de radar permite identificar el perfil de madurez de la evaluación, con lo cual se compara con los perfiles de referencia y se establece la distancia de esta evaluación de madurez y el perfil de referencia más cercano.

- Análisis del estado actual de la gestión de producción de proyectos de construcción

El IGM es consecuencia de la evaluación individual de los atributos. Con la herramienta de calificación se identifica el estado actual de madurez y se precisa la influencia de cada atributo en el alcance de la madurez actual. Por lo tanto, a partir del conocimiento de las evaluaciones individuales y de cómo ellas impactan la calificación global, se obtiene la información para seguir a la segunda fase.

Segunda fase de aplicación del SLC-EModel

En esta fase se cuenta con la evaluación de madurez y se define el nivel de madurez objetivo por medio del IGMe. Esta es la meta parcial a la que se desea llegar de camino a la madurez. En directa relación con el IGMe se definen los beneficios que deben ser alcanzados. El planteamiento de beneficios esperados es un indicador para evaluar más adelante la efectividad del avance en el nivel. Este se refiere al beneficio parcial a alcanzar en el camino hacia el beneficio que ofrece un proceso maduro. En esta fase se definen dos tipos de indicadores: (a) nivel de madurez objetivo y (b) beneficios del cambio. Intervienen la alta dirección y los equipos de selección de opciones de evolución, calificación y evaluación. Su objetivo es preparar las opciones de avance de madurez para la toma de decisiones. En la Figura 5.11 se muestra el diagrama de flujo del proceso de esta fase.

- Definición del estado futuro de la gestión de producción de proyectos de construcción

Con el IGM_c se hace uso de la aplicación del SLC-ES para identificar el IGM_o . Este es el índice global en la escala original para el IGM_c , el cual se obtiene mediante un cambio de escala en el sentido inverso que se utilizó para calcular el IGM. Este IGM_o debería ser el resultado de la calificación de los atributos a ser intervenidos para lograr el IGM_o . La combinación de atributos a ser intervenidos obedece a diferentes combinaciones posibles con las que se logran diferentes IGM_o . Sin embargo, todas las posibilidades no son viables, así que se debe efectuar una selección de aquellas combinaciones cuyos atributos guarden cercanía con la evaluación de madurez

de estos. Esta cercanía permite un avance de evolución al siguiente nivel. De tal manera que con las combinaciones así seleccionadas se verifica la capacidad de la organización para intervenir los atributos y posteriormente elaborar el plan maestro de evolución.

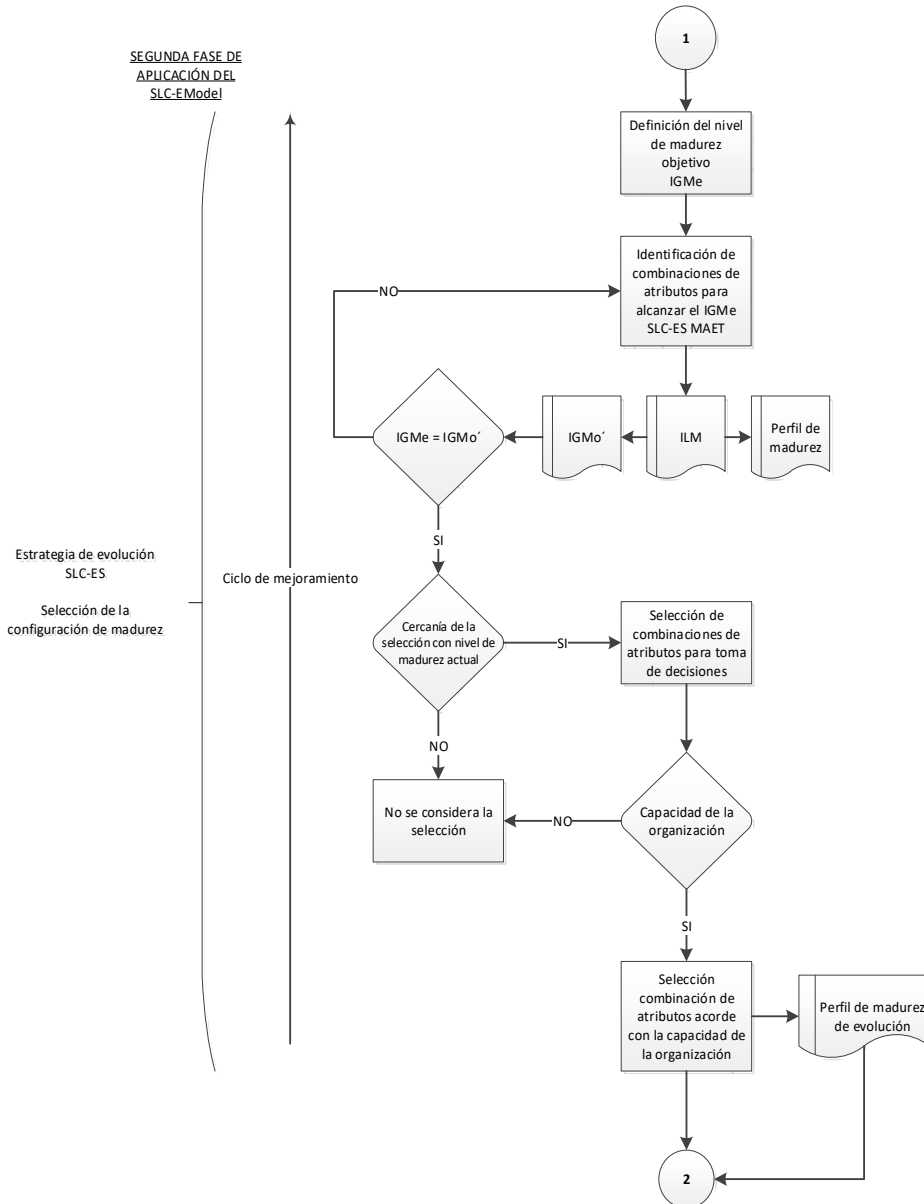


Figura 5.11. Segunda fase de aplicación del SLC-EModel.

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo con el ejemplo del apartado 5.2.6 (pág. 186), se explica el proceso referido a la segunda fase:

Para el ejemplo, la madurez objetivo es $IGM_e = 2,0$. En la Tabla 5.9 se presenta el $IGM_e = 2,0$, el cual es definido por la organización luego de conocer el resultado de la evaluación de madurez. Para este caso, la evaluación de madurez obtuvo un $IGM = 1,33$, de esta manera, la organización decide dar un salto desde un nivel de madurez de 1,33 a un nivel de madurez de 2,00. Al realizar dos transformaciones de escala, primero de una escala entre 1 y 5 a una entre 0 y 1, se obtiene el índice objetivo $IGM_o = 2,32$ en la escala del modelo.

Este $IGM_o = 2,32$ se puede obtener con diversas combinaciones de madurez de los atributos. En cualquier caso, cada una de estas combinaciones calificadas con el SLC-QT hace uso del coeficiente de calificación de cada FM para obtener el IGM_o (segunda columna de la Tabla 5.9), una vez se hayan calificado los FM. La tercera columna queda en blanco a la espera de las combinaciones de atributos que alcance el IGM_e .

La combinación de atributos se realiza con ayuda del SLC-MAET (que para esta fase se denomina SLC-ES MAET) para identificar las combinaciones para el IGM .

Tabla 5.9. Definición del índice global de madurez objetivo (IGMe)

Índice global de madurez objetivo - IGMe					
Factor de madurez	Coefficiente de calificación de FM	IML mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM	IGMo Sin ajustar	IGMe Cambio de escala (0-1)	IGMe Cambio de escala (1-5)
CommTM	0,154				
LeaderSh	0,134				
TeamWork	0,122				
WorkEnv	0,142		2,32	0,250	2,00
SupporOp	0,151				
SPImprov	0,132				
ProImpr	0,165				

- Selección de combinaciones de atributos para toma de decisiones

Con las combinaciones identificadas en el paso anterior, se consulta la distancia de la madurez de cada uno de sus atributos con el nivel de madurez inmediato superior y se seleccionan aquellos que tengan una diferencia de un nivel de madurez. De esta manera, se eligen las combinaciones que serán

objeto de revisión frente a la capacidad de la organización para atender la evolución hacia el siguiente nivel de madurez de cada uno de los atributos que contribuyan a alcanzar el IGM_c .

- Identificación del perfil de madurez de evolución que impulsa la gestión de producción de proyectos de construcción al siguiente nivel

Con base en las combinaciones de atributos seleccionadas, se identifican sus perfiles, y estos son los que tienen más posibilidades de ser implementados. Los criterios para seleccionar los perfiles son los siguientes:

- Todos los atributos tienen la misma oportunidad de pasar al siguiente nivel de madurez.
- Un atributo, en condiciones normales, puede avanzar un nivel a la vez.
- Si se desea que un atributo avance más de un nivel de madurez, debe recibir recursos adicionales que lo hagan dar ese salto.
- Los atributos se pueden combinar en todas las posibilidades, de tal manera que la calificación del IGM obtenido sea igual o muy cercano al IGM_c .
- Una pista para identificar el mejor perfil a seleccionar en esta fase es hacer que los atributos avancen al siguiente nivel interviniendo la menor cantidad de atributos.

En el ejemplo que se viene desarrollando, en la Tabla 5.5, en la columna denominada “Selección SLC-SM MAET” se propone una combinación de evolución de atributos con la cual se lleva el $IGM = 1,33$ a un $IGM = 2,00$.

- Comparación de las condiciones actuales y la capacidad de la organización para cumplir los requerimientos que exige el estado futuro

En este punto se dispone de varias configuraciones de combinaciones de atributos viables para ser implementados, con los cuales se consultan la capacidad y los recursos de la organización para ser llevados a cabo y elaborar el plan maestro de evolución. De esta manera se selecciona la combinación que, a juicio de la alta dirección, pueda ser implementada de acuerdo con la disponibilidad de recursos.

Para el ejemplo, con la combinación de atributos de la sexta columna de la Tabla 5.5 se realiza el análisis a continuación.

Los perfiles de los atributos intervenidos se presentan en los diagramas de radar dibujados en color rojo, Figuras 5.6 a, b y c, y el perfil resultado de los ILM para la evolución se dibuja en la Figura 5.7 también en color rojo. De igual manera, el $IGM_c = 2,00$ equivalente al $IGM_o = 2,33$ ligeramente

superior al objetivo 2,32 en la escala sin transformar. En la Tabla 5.9 se muestran los resultados de esta selección de combinación de atributos. Se puede observar la diferencia entre la columna “IML mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM” de la Tabla 5.10 y la columna del IML_i de la Tabla 5.7. Estas columnas, para efectos de comparación, se presentan en la Tabla 5.11, en la que se muestran los resultados de madurez de los FM para la evaluación con $IGM=1,33$ y la evolución con $IGM_e=2,00$.

Tabla 5.10. Índice global de madurez objetivo (IGMe) obtenido de la selección con el SLC-SM MAET

Índice global de madurez objetivo - IGMe					
Factor de madurez	Coficiente de calificación de FM	IML mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM	IGMo Objetivo de evolución Sin transformar	IGMo Cambio de escala (0-1)	IGMo Cambio de escala (1-5)
CommTM	0,154	2,072	2,33	0,251175687	2,00
LeaderSh	0,134	2,431			
TeamWork	0,122	2,355			
WorkEnv	0,142	2,011			
SupporOp	0,151	2,766			
SPImprov	0,132	1,970			
ProImpr	0,165	2,616			

Tabla 5.11. Comparación entre el IGM de la evaluación 1,33 y el IGMe para la evolución al nivel 2,00

ILMi	IML mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM
IGM= 1,33	IGM= 2,00
1,277	2,072
1,348	2,431
1,605	2,355
1,538	2,011
1,884	2,766
1,268	1,970
1,803	2,616

Con la columna “IML mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM” se confirma que se puede alcanzar el $IGM_c = 2,00$. Adicionalmente, se verifica que el modelo de calificación es consistente y estable para realizar el proceso de calificación como apoyo a la estrategia de evolución. A partir de este punto, se toman decisiones en el máximo nivel jerárquico, la alta dirección, con el apoyo del equipo de selección de alternativas.

Tercera fase de aplicación del SLC-EModel

La alta dirección es la instancia que establece el direccionamiento estratégico de la organización para el cumplimiento de las metas empresariales. Sin embargo, este direccionamiento no es posible si no hay una clara colaboración entre todas las partes del sistema. Las actividades de la tercera fase están a cargo de la alta dirección con apoyo del equipo de selección de opciones de evolución. Se dispone de la combinación de atributos seleccionada que se ajusta a las expectativas y capacidades de la organización. En la Figura 5.12 se muestra el diagrama de flujo del proceso de esta fase.

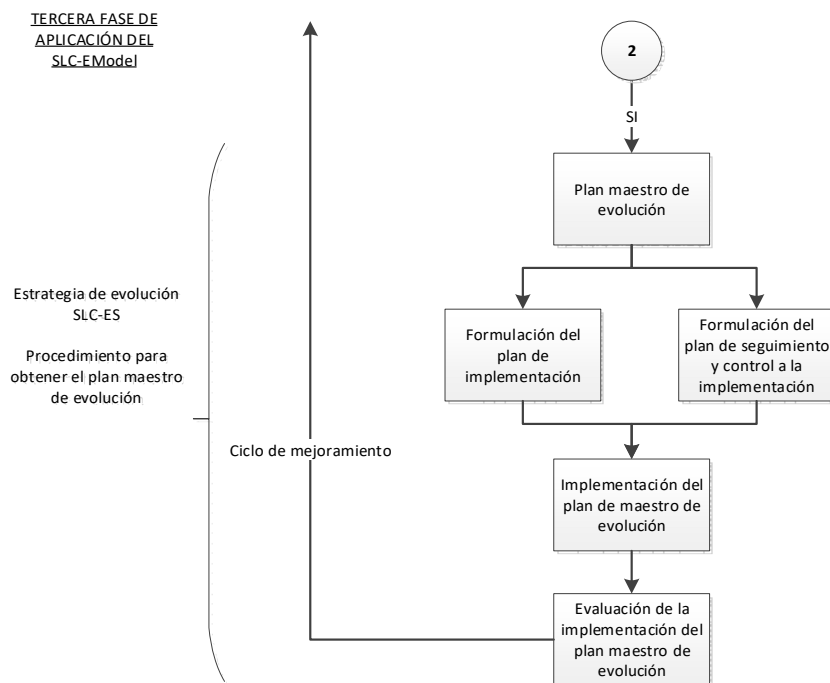


Figura 5.12. Tercera fase de aplicación del SLC-EModel.

Fuente: elaboración propia.

La evaluación es una actividad que agrega valor a la organización; con ella se evidencian las situaciones que se oponen a la evolución, se abordan y se superan. En la Figura 5.13 se presenta una versión preliminar de la cadena de valor de la evaluación de madurez con el SLC-EModel que puede ser tomada por las organizaciones para construir su propia cadena de valor. En la Figura 5.14 se representan las comunicaciones entre los procesos de gestión y los procesos de ejecución con flechas en dos vías que indican que la comunicación se establece en un canal de dos vías propiciando interacción entre los participantes. La organización es el cliente del proceso de evolución, y las personas y los procesos del proyecto de construcción son los proveedores de información para la evaluación.

Este es un sistema *pull*, en el que la necesidad de mejoramiento requiere del proceso de evolución. El cliente espera el salto a un nivel de madurez superior y la entrega de un plan de mejoramiento implementado y evaluado para verificar su alcance al siguiente nivel. Para esto se necesita la implementación y verificación de la efectividad de la implementación.

Previamente, se debe definir el plan de acción, el plan de mejoramiento y su plan de seguimiento. La selección de la alternativa de evolución entre las opciones identificadas a partir de la calificación de la madurez se realiza con la evaluación de la madurez de los atributos de manera individual por las personas, quienes conforman equipos de trabajo alrededor de sus procesos.

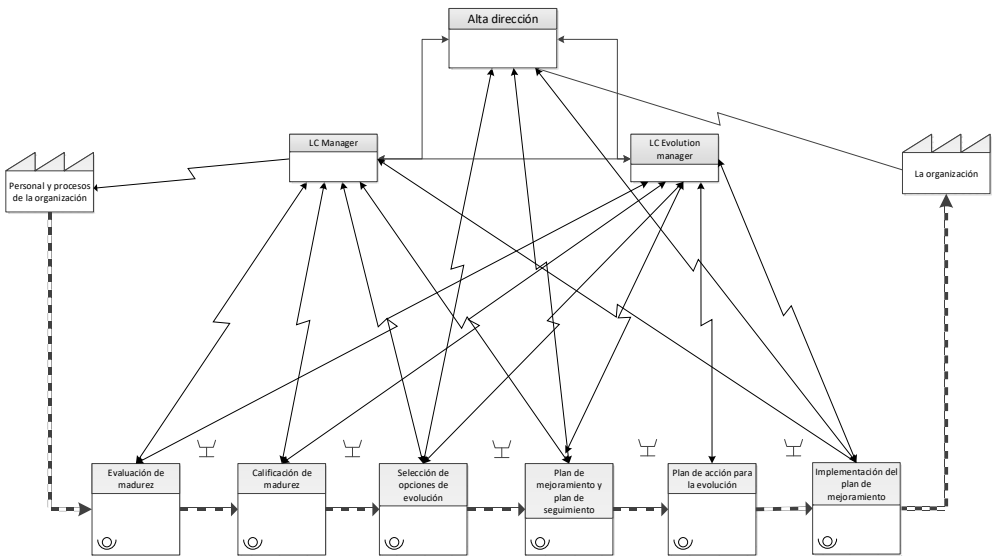


Figura 5.13. Cadena de valor de la evaluación de madurez.

Fuente: elaboración propia.

- Formulación del plan maestro de evolución para alcanzar el estado futuro

La ejecución de este plan lleva la GPC al siguiente nivel. Este plan está compuesto por un plan de implementación y un plan de acción. Se diseña a partir de la definición de las metas de evolución y la expectativa de resultados reales que se pretenden alcanzar con el avance al siguiente nivel. Es por eso que se trata de un trabajo con un alto nivel de conocimiento del impacto que produce un salto en evolución por parte de la alta dirección.

En el plan de mejoramiento se establecen todos los requerimientos para intervenir los atributos y avanzar al siguiente nivel de madurez, con la definición de indicadores que demuestren el alcance del mejoramiento, la intención y la meta. El plan de acción, por su parte, establece responsables, define programas de trabajo, asigna recursos, indica mecanismos de seguimiento y ajuste al plan y propone incentivos para todos los participantes.

- Seguimiento y control a la ejecución del plan

Cada tarea prevista en el plan de implementación es objeto de seguimiento y control del avance de su ejecución. Se establecen indicadores de avance y se prevé la forma de corregir las desviaciones del plan. Para esta actividad, la herramienta más apropiada es el sistema del último planificador (Last Planner System, LPS, por su sigla en inglés). El LPS no es una herramienta solo para la fase de construcción, también puede ser usada en todo tipo de proyectos y en cualquier fase del desarrollo del proyecto de construcción. La ejecución del plan maestro de evolución es un proyecto de gran envergadura para la organización. La aplicación del LPS para la planificación y control de la ejecución de este plan será objeto de una investigación futura.

- Autoevaluación permanente

El SLC-EModel promueve la autoevaluación como parte del crecimiento cultural de la organización y, como producto de esta investigación, se fortalece la definición de Lean Construction. LC promueve el desarrollo de una cultura con enfoque en el cliente, que persigue permanentemente el desperdicio, y de mejora continua apoyada en la autoevaluación permanente. Un proceso de evolución de la madurez fundamentado en el SLC-EModel requiere el desarrollo de un sistema de información y de comunicación que permita la gestión del flujo de información. El proceso de evolución de la madurez es un proceso de producción en sí mismo; es un proceso de producción de información con un fin preciso, la evolución.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES GENERALES

En la investigación realizada se diseñó un modelo de evolución de la madurez de Lean Construction en la gestión de proyectos de construcción (SLC-EModel). Este modelo es una herramienta, o artefacto, como lo denomina el Design Science Research (DSR), para ayudar a orientar las acciones de mejoramiento de la gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) al integrar Lean Construction (LC) como su sistema de producción.

Se desarrolló de un modelo de madurez con el cual se logra medir el nivel de madurez de LC en la GPC y se estudian e identifican las relaciones entre los diferentes elementos de la madurez.

El SLC-EModel es una herramienta que apoya la definición de estrategias de mejoramiento de la producción de proyectos de construcción con la integración de LC como su sistema de gestión cuya validez se verifica en cuatro instancias del desarrollo del modelo.

Se trata de una herramienta que se prevé puede contribuir a mejorar continuamente la eficiencia de la producción de construcción. Una mejora de eficiencia trae como consecuencia la mejora de la productividad que beneficia a la organización y al sector.

El SLC-EModel se propone como una herramienta útil para contribuir con el desarrollo del sector de la construcción y podría ser fácilmente adaptado en otros sectores de producción de bienes o servicios. Su creación fue prevista con enfoque en LC; sin embargo, su desarrollo permitió la obtención de un modelo de características genéricas. A su vez, los elementos asociados a estas categorías, a pesar de ser utilizados en la implementación y desarrollo de LC, son comunes a otros procesos de producción.

El SLC-EModel se compone de tres categorías, siete factores de madurez y treinta y cinco atributos de madurez. Las *categorías* son los constructos de mayor nivel del modelo y se componen de *factores de madurez* (FM); los FM agrupan los *atributos de madurez* que los explican; son los constructos

de nivel intermedio del modelo, y los atributos se hallan en el nivel básico del modelo. Las tres categorías de madurez del modelo son:

- Personas
- Sistema de producción
- Soporte de la organización a la producción

En el diseño del SLC-EModel se identificaron elementos relevantes directamente relacionados con la madurez de LC en la GPC. Estos elementos fueron clasificados en las tres categorías de madurez mencionadas subordinadas a los FM.

Para el sistema de producción de proyectos de construcción, las personas son muy importantes. La producción se lleva a cabo con personas y las implicaciones que directamente tienen que ver con personas se encadenan para aportar en la mejora del flujo de producción. En el proyecto de construcción, todos los procesos se realizan con personas; las personas conforman equipos, y los equipos se desenvuelven en los ambientes de trabajo. De esta manera, las empresas no deben dejar de concentrar sus esfuerzos en la formación de su capital humano; este es un concepto que refuerza la concepción del modelo. El desempeño de LC se basa en la gente; así que se debe fortalecer el capital humano y construir una cultura LC.

Para lograr la adopción y la aplicación de tecnologías de proceso en la industria de la construcción, se requiere de una mejor comprensión de las prácticas de gestión de la innovación. Un modelo de evolución debe ser una herramienta sencilla de aplicar, que incluya las personas en los diferentes niveles de la organización de manera sistémica. Un modelo de este tipo se aplica a toda la GPC y debe reflejar lo que sucede en cada fase del proyecto.

El modelo debe ser entendido y aplicado como un proceso de autoevaluación, en el que se califica el nivel de implementación de las prácticas y la integración de procesos con el uso de indicadores mediante el establecimiento de condición de mínimas prácticas. Alcanzar un primer nivel de madurez es el reconocimiento del proceso de implementación de LC con el cual se da inicio al desarrollo de un proceso progresivo de madurez.

DEFINICIONES PROPUESTAS EN EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de la investigación se presenta la necesidad de contar con una serie de definiciones, las cuales son importantes para el avance del trabajo; así que, en ausencia de algunas de ellas, o porque aún no se cuenta con definiciones precisas, de la investigación realizada se proponen las siguientes:

Cumplimiento de la oferta de valor

Es la materialización de los atributos integrados a un producto o servicio, en su fabricación o desarrollo, luego de ajustar el sistema de producción a una adecuada interpretación de las expectativas del cliente.

Lean Construction

Lean Construction es un sistema de producción de proyectos de construcción, cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la oferta de valor por medio de: (a) la aplicación de los principios de la producción Lean en la industria de la construcción, (b) el desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas, con enfoque en el cliente y de autoevaluación permanente y (c) la utilización e innovación de la tecnología para la gestión y mejoramiento continuo de la producción.

Madurez

La madurez es el estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. Es un estado que se va alcanzando paulatinamente al transitar por diferentes estados de inmadurez, o niveles de madurez, que permiten escalar hacia un estándar máximo, un nivel de excelencia de referencia para el contexto, un “Gold Estándar” (definición basada en Cano y Rivera, 2015).

Modelo de excelencia en Lean Construction

Un modelo de excelencia en LC es un marco sistémico de aplicación de principios que la organización adopta como guía. Orienta la generación de estructuras organizacionales que conducen comportamientos sistémicos para la búsqueda constante de altos rendimientos y rápido acercamiento a sus metas. Los altos niveles de madurez son coherentes con la estrategia organizativa, lo que propicia altos estándares de aplicación de los principios de manera sostenida. El impulsor es la construcción de valor para el beneficio de los clientes, de los accionistas y de la sociedad.

Modelo de madurez de LC en la GPC

El modelo de madurez es el estándar de madurez completa del ciclo de la gestión del sistema de producción de proyectos de construcción con el uso de Lean Construction. Este estándar permite identificar el alcance progresivo de la madurez hacia la excelencia por medio de la calificación del estado de madurez de cada uno de los elementos que lo componen.

CONCLUSIONES SOBRE LOS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA PRODUCCIÓN LEAN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

El cumplimiento de la oferta de valor

La gestión Lean del proyecto debe sincronizar todos los elementos que participan del proceso de producción de proyectos de construcción hacia la meta global, la mejora de la eficiencia para responder mejor al cumplimiento de la oferta de valor. El articulador de la producción es el valor, especificado a partir de los requisitos e intereses del cliente. Con la identificación del valor desde el punto de vista del cliente, se configura la oferta de valor. A partir de la oferta, el sistema de producción se ajusta a las condiciones que permitan crear y entregar el valor ofrecido. El sistema de producción debe ser ajustado para cumplir estrictamente con la oferta de valor, ni más ni menos.

La producción en construcción

La producción de proyectos de construcción es un tipo de sistema de producción por proyectos; sin embargo, el proyecto de construcción es diferente a cualquier otro tipo de proyecto y sus productos poseen características que los hacen únicos. Con la investigación realizada, se propone ampliar la clasificación de Miltenburg (1995) para incluir los proyectos de construcción con la característica de flujo como “flujo acompasado por la unidad de producción”, que para el caso de la industria de la construcción, y con mayor énfasis en la construcción de edificaciones, la unidad de producción es la cuadrilla de trabajo.

El desempeño de Lean Construction

Se identifica en la comunidad académica un creciente interés en evaluar el desempeño de LC para entender si el esfuerzo está produciendo resultados que beneficien a la organización. El SLC-EModel es un primer modelo de evolución de LC que se propone a la comunidad académica y profesional LC para la GPC, con el fin de acortar la brecha de la disponibilidad de herramientas de evaluación del desempeño de LC, toda vez que la literatura evidencia que se dispone de un limitado grupo de iniciativas de evaluación de LC. Dichas iniciativas se enfocan principalmente en la fase de construcción y solo un modelo a evaluar la capacidad de la organización a partir de la implementación de LC.

Se identificaron cuatro iniciativas de evaluación de LC, de las cuales tres se concentran en la fase de construcción y una de ellas en la madurez de LC en la organización de construcción, en la que el proyecto de construcción es

un factor de evaluación. En otros entornos se identificaron diversas metodologías para evaluar la madurez Lean; sin embargo, de estas iniciativas se extrajeron conceptos para apoyar la identificación del elemento de madurez. Entre estas consideraciones se identifican coincidencias en temáticas como la implementación de LC, los principios LC, las herramientas utilizadas en LC y la manera como las personas se relacionan con LC, principalmente.

Se evidencia una alta concentración de MM con enfoque en el Capability Maturity Model Integration (CMMI). Hay una alta incidencia de evaluaciones relacionadas con el desempeño de las herramientas LC en obra; sin embargo, las otras fases del proyecto están desatendidas pese a que se critica el hecho de que las fases de planeación y contratación son muy importantes para el buen desempeño de la fase de ejecución de la obra.

El desarrollo de las herramientas identificadas para evaluación de LC hace uso de métodos de investigación cualitativos, como entrevistas, encuestas, consultas a grupos focales, observación y recolección de información en sitio. En la mayoría de los casos, solo se utiliza la entrevista. También se utiliza una combinación de herramientas en el marco del desarrollo de métodos mixtos de investigación (métodos cualitativos y cuantitativos).

Los procesos de validación de las herramientas son escasos, lo que indica la existencia de una brecha entre el desarrollo de modelos de evaluación de madurez y su validación. No se identificó, en el desarrollo de este estudio, ninguna iniciativa que apoye la evolución de madurez de la aplicación de LC.

Barreras y factores críticos de éxito (FCE)

La implementación de LC se enfrenta a situaciones que se oponen a su avance, así como también se apoya en acciones que las favorecen. Se propone enfrentar los FCE a las barreras para mitigarlas y eliminarlas, ya sea previo al inicio de la implementación o durante el proceso, a fin de evitar o reducir el impacto en el éxito de la implementación.

La implementación de Lean Construction

La claridad en los beneficios que la organización espera de LC es la principal condición para iniciar un proceso de implementación. En cierto modo, esta claridad es la condición con la cual se planifican las actividades y tareas relacionadas con la implementación. Por lo general, el beneficio de la implementación se experimenta en la mejora de la rentabilidad del negocio, al ser cada vez más eficiente para incrementar la productividad.

Hay diferencia entre implementar LC en la organización y en el proyecto. En la organización de construcción se conduce una implementación en

términos de pensamiento Lean y, en el proyecto, la implementación se basa en el cumplimiento de los principios LC y en la evolución de los atributos que contribuyen a alcanzar esta madurez.

La implementación puede iniciar por el diseño, por la producción, por el cliente o por los proveedores; esto depende de identificar aquella parte del proceso de producción que sea más influyente para otros procesos. Esto conduce la decisión de empezar a intervenir procesos internos o procesos externos, algunos con más énfasis en la relación con el cliente: los proveedores. En la actualidad no hay una orientación para realizar una implementación precisa y efectiva de LC que obedezca a entender la importancia de los elementos de madurez que impactan en el mejoramiento del sistema de producción y de la producción misma.

El consenso entre expertos sobre los beneficios de la implementación en el corto plazo establece que estos corresponden a la reducción de desperdicios, el incremento de la productividad, el aumento de la rentabilidad, el mejoramiento del flujo de trabajo y el aumento del valor. En el largo plazo, propician mayor retención de personal para el proyecto y el ciclo de la GPC, mejora del ambiente de trabajo, incremento en la seguridad para las personas, más control del proyecto, mayor flexibilidad, desarrollo de una cultura en torno al mejoramiento continuo y eliminación constante del desperdicio; una cultura que habla el mismo idioma.

Principios Lean Construction

En la investigación realizada, los principios LC se organizaron en dos grupos: el mejoramiento del sistema de producción y el mejoramiento de la producción. Esta agrupación se sugiere a partir de la correlación de los atributos de madurez identificada en la construcción del SEM (los once principios LC están incluidos en la categoría proceso de producción como atributos de madurez).

Se identificaron cuatro principios adicionales que se integran al grupo de mejoramiento del sistema de producción. Se sugiere integrar cuatro principios a los once propuestos por Koskela (1992):— Desarrollo, uso y mantenimiento de estándares.

- Conocimiento, selección y uso apropiado de herramientas LC.
- Desarrollo de un sistema *pull*.
- Cumplimiento de la oferta de valor.

Sostenibilidad de LC

Con la utilización de LC, como un sistema de gestión de proyectos de construcción, se identifican con más precisión los objetivos involucrados en el

desarrollo de la producción y entrega del producto, con base en el entendimiento del valor desde el punto de vista del cliente. Sin embargo, es importante buscar la sostenibilidad de la aplicación de LC; de lo contrario, se corre el riesgo de volver a los esquemas tradicionales. La base del éxito en la sostenibilidad de LC en la GPC es el entendimiento de sus principios y la manera como estos se despliegan en el proyecto y en la organización a través del fortalecimiento de una cultura dispuesta al cambio y al alcance progresivo de la madurez con el uso de LC.

CONCLUSIONES SOBRE LAS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Se identificó a partir de la consulta a sesenta y nueve expertos un amplio grupo de características que muestran la manera en que LC madura en su relación con la GPC. A partir de la investigación realizada se puede profundizar en estas y otras características con base en las relaciones obtenidas con el SEM.

Se seleccionaron 425 elementos relacionados con la madurez de LC a partir de la revisión bibliográfica y la consulta a expertos que fueron agrupados en tres categorías, siete factores y treinta y cinco atributos de madurez.

La herramienta para realizar la evaluación de madurez de LC en la GPC resulta de un desarrollo propio, novedoso y se configura como un importante aporte para la industria de la construcción.

Se desarrollan gráficamente dos tipos de perfiles definidos en el SLC-EModel. Perfiles para los factores de madurez, los cuales muestran gráficamente el alcance de la madurez de cada factor con sus atributos relacionados y el perfil para la madurez del sistema, el cual se construye a partir de los factores de madurez.

Las acciones para avanzar hacia niveles superiores de madurez son conducidas por la estrategia de evolución, la cual requiere de la evaluación de la madurez y, con ayuda de las relaciones identificadas con el SEM, se establecen las rutas de evolución de acuerdo con la evaluación de madurez obtenida.

CONCLUSIONES SOBRE EL LOGRO DE LOS OBJETIVOS

El objetivo general se alcanza con el diseño del modelo; sin embargo, este no se puede llevar a cabo sin el cumplimiento de los objetivos específicos. Cada uno de estos objetivos se logra con ayuda de métodos y herramientas asociados con la metodología propuesta.

Resumen sobre el logro de los objetivos específicos

Objetivos específicos	Cómo se logra el objetivo	Evidencia del logro
Precisar las características de la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean.	Revisión de referencias bibliográficas y resultados obtenidos en las entrevistas a expertos.	Capítulo 2 y Capítulo 3, páginas 123 y 139.
Escoger los elementos involucrados en la madurez e identificar las relaciones entre ellos que conduzcan a estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC.	Revisión de referencias bibliográficas y resultados obtenidos en las entrevistas a expertos.	Capítulo 3, páginas 126-138; Capítulo 4, páginas 162-166.
Adaptar y/o desarrollar una herramienta de evaluación de madurez de LC en la GPC, que permita conocer el nivel actual para orientar su evolución hacia niveles superiores de madurez.	Desarrollo de un modelo de evolución de LC en la GPC con base en la información obtenida de la consulta a expertos por medio de la encuesta.	Capítulo 5, páginas 204-226.

CONCLUSIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE EVOLUCIÓN

Una evaluación de la madurez no debe ser vista como una auditoría; si esta fuera la visión, perdería relevancia el modelo para conducir un avance hacia niveles superiores de madurez. El proceso de evolución se conduce con apoyo del SLC-EModel, como un ejercicio de autoevaluación con el convencimiento de que cada persona en el sistema tiene el potencial de aportar a la construcción de la madurez de la GPC y de la organización.

Este modelo se concibe como una herramienta para la autoevaluación, por medio de la cual se identifica el estado de madurez de LC en la GPC; asimismo, se define una estrategia de evolución con el propósito de construir el plan de mejoramiento, también con la participación de las personas y los equipos de la evaluación.

El proceso de evolución de la madurez se concibe como un proceso sistémico con el cual se persigue un objetivo común: mejorar la eficiencia del sistema de producción de proyectos de construcción para incrementar la productividad de la organización. De esta manera, considerando el enfoque Lean, que es participativo y colaborativo, se fundamenta la importancia de definir el plan de evolución de manera participativa y colaborativa.

CONCLUSIONES METODOLÓGICAS

La investigación en ciencia del diseño (DSR, por su sigla en inglés) fue la metodología de investigación seleccionada para el desarrollo de la investigación realizada. Esta forma de investigación es aceptada ampliamente por la comunidad académica e investigadora en temas de gestión de la construcción y especialmente por la comunidad que investiga específicamente en LC.

Con el uso de la metodología DSR se estudia el fenómeno de madurez y se desarrolla una solución a un problema real como es la necesidad de identificar la madurez de LC en la GPC y establecer la manera de evolucionar hacia un nivel superior de madurez.

Esta investigación consideró la realidad del fenómeno de la madurez y realizó una aproximación a su complejidad como una manera de entenderlo. Se verificaron los criterios de calidad para considerar el rigor de esta investigación en su ámbito cualitativo, así:

- El estudio cuenta con la **fiabilidad** o **consistencia** para que pueda ser replicado por otros investigadores para obtener resultados similares.
- La **validez** de los resultados fue probada a lo largo de las etapas de obtención de la información y construcción del SEM.
- Se puede asegurar la **autenticidad** de la investigación, ya que sus resultados representan ampliamente el fenómeno de madurez observado sin dejar espacio a interpretaciones *a priori* de la investigadora. Los resultados del SEM representan clara y ampliamente los constructos a los que hace referencia.
- Los resultados de esta investigación se pueden **transferir** a otros sectores, dado que, con la intención de obtener un modelo para LC en la GPC, se dispone de un modelo genérico que puede ser usado al ser adaptado en procesos de madurez de producción de bienes o servicios.
- Los datos para el estudio corresponden a la opinión de los expertos en LC, cuya calidad de la selección de ellos fue confirmada con el Alfa de Cronbach, por lo que se cumple con el criterio de **dependencia**, ya que, para una réplica del estudio, se pueden obtener resultados equivalentes.
- La **neutralidad** del estudio está garantizada por el tratamiento de la información obtenida de los expertos por medio de las entrevistas y encuestas; a esta información se le dio el tratamiento objetivo para su integración a la investigación.
- El estudio es **relevante** para el entendimiento del fenómeno de madurez de LC en la GPC y permite el planteamiento de conceptos, definiciones y aportes al estado del conocimiento en LC.

- El problema de investigación fue abordado cuidadosamente apoyado en la teoría y desarrollo del conocimiento en la temática del desarrollo de LC en el sector de la construcción y específicamente de LC en la GPC, lo que garantiza la **concordancia teórico-epistemológica**.

CONSIDERACIONES FINALES

A partir del trabajo realizado en el desarrollo de la investigación, que incluye la revisión de la literatura y la interacción con los expertos, se reitera que el uso de LC, como el sistema de producción de proyectos de construcción, es una adecuada elección para las organizaciones de construcción en el desarrollo del proyecto de construcción.

Aún se dispone de pocas alternativas de evaluación del desempeño de LC. Las existentes se enfocan principalmente en la fase de construcción y pocas en la organización. Sin embargo, es importante que se disponga de una herramienta que permita evaluar la madurez de LC en la GPC más que en la organización. Una organización se puede evaluar con herramientas empresariales; sin embargo, el proceso de GPC es particular para el sector de construcción, por lo que contar con una herramienta de evaluación contextualizada aporta en la evolución hacia procesos más maduros en la GPC y en la organización misma.

Con el SLC-EModel se conoce el estado de madurez y se propone la estrategia para avanzar hasta obtener la madurez de LC en la GPC. Avanzar hacia niveles mayores de madurez va desarrollando capacidad en la organización y en la GPC para mejorar la eficiencia de la producción, además de desarrollar un lenguaje común, un pensamiento sistémico, así como el desarrollo y el mejoramiento del sistema de producción con enfoque en el cliente.

El SLC-EModel fue construido y validado para ofrecer un modelo que evaluara el estado de madurez del alcance de LC en la GPC, considerando los atributos precisos que orientan la evolución de la madurez de LC. Por lo que se puede afirmar que la comunidad LC ahora dispone de una herramienta útil para contribuir a la mejora de la eficiencia de la GPC, que considere el cumplimiento de la oferta de valor como el principal concepto que mueve el sistema. Este modelo se considera un estándar con el que se pueden conducir los procesos de implementación y de madurez de LC.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA USAR EL SLC-EMODEL¹⁴

Las siguientes son orientaciones para la implementación del SLC-EModel en la evolución de LC en la GPC en las tres fases de aplicación del modelo:

1. Desarrollar un proceso de evolución de LC en la GPC. Esta función debe desempeñarla la alta dirección.
2. Definir los resultados esperados, los incentivos del logro del mejoramiento y la forma de obtención de los resultados. Esta decisión debe estar a cargo de la alta dirección.
3. Constituir el sistema de evolución de la madurez de LC en la GPC como política de la alta dirección.
4. Constituir el sistema de información y comunicación para la aplicación del SLC-EModel.
5. Constituir los equipos de personas para la aplicación del modelo.
6. Entrenar a cada persona de los equipos en el conocimiento y uso del SLC-EModel.
7. Disponer para cada persona de la GPC el acceso al sistema de información y comunicación para el proceso de autoevaluación con fines de evolución.
8. Evaluar la madurez de LC en la GPC con el uso del SLC-MM, para lo cual se debe:
 - a. Evaluar los atributos del modelo con uso de SLC-MAET. En el desarrollo de esta evaluación, se debe realizar la evaluación del subnivel de madurez de cada atributo.
 - b. Calificar la madurez con ayuda del SLC-QM y obtener los ILM y el IGM.

¹⁴ Cualquier requerimiento respecto del uso del SLC-EModel, por favor contactar a la autora: sandra.cano@correounivalle.edu.co - Universidad del Valle, Sede Meléndez - Escuela de Ingeniería Civil y Geomática - Calle 13 n.º 100-00, Edificio E48, Oficina 2022, teléfono +57 2 3212100 ext. 7231 - Cali, Colombia

9. Elaborar los perfiles de madurez, tanto para FM como para el IGM, a partir de la calificación, y representarlos en diagramas de radar.
10. Definir el índice global de madurez objetivo (IGM_o).
11. Identificar las diferentes combinaciones de los atributos.
12. Seleccionar las combinaciones cuya cercanía con el nivel de madurez actual no difiera en más de un nivel.
13. Identificar la combinación de atributos que responda a la capacidad de la organización para adelantar la evolución hacia el IGM_c .
14. Decidir la mejor configuración de la evolución de atributos que los acerque al IGM_o . Esta decisión está a cargo de la alta dirección con ayuda de los equipos del sistema.
15. Formular el plan estratégico de evolución.
16. Formular el plan de seguimiento y control a la implementación.
17. Implementar el plan de evolución.
18. Evaluar la efectividad de la implementación del plan maestro de evolución.
19. Realizar una nueva aplicación del SLC-EModel.

TRABAJOS FUTUROS

Una vez se cuenta con el SLC-EModel, se abre la posibilidad de dar continuidad a este desarrollo y a otros que han sido identificados en el paso por cada temática estudiada.

1. La primera investigación es el desarrollo de la herramienta de evaluación de madurez de atributos (SLC-MAET) y del modelo de madurez (SLC-MM). Esta herramienta deberá contener la información que permita identificar con precisión la madurez de cada atributo en el modelo, reduciendo la subjetividad en la evaluación de los atributos y el nivel de madurez que alcanza cada atributo. En este sentido, las características de los atributos deben ser definidas con detalle, así como los indicadores apropiados. Estos indicadores serán la base para el seguimiento del mejoramiento hacia un mayor nivel de madurez.
2. La evaluación de los atributos es una oportunidad para estudiar las mejores prácticas relacionadas con el proceso de implementación de LC.
3. Realizar una implementación del SLC-EModel en diferentes empresas, tanto en el orden nacional como internacional, cuyo nivel de avance en la implementación de LC sea notable. A partir de esta implementación, validar en campo el modelo para aplicarlo posteriormente en organizaciones con menores niveles de madurez para establecer diferencias y similitudes en el proceso de evolución.
4. Desarrollar un sistema de información que soporte la evaluación de madurez y la estrategia de evolución. Desarrollar un sistema de recolección diario de información para alimentar constantemente el modelo, de tal manera que se obtengan indicadores tanto de proceso como de resultado para toma de decisiones y para el seguimiento constante al proceso de evolución.
5. Desarrollar un sistema de entrenamiento de profesionales en el modelo para fortalecer la implementación en las organizaciones, así como propiciar la fortaleza para la autoevaluación con ayuda del modelo.

6. Evaluar el modelo de evolución para obtener posteriores versiones de este. Esto lleva a prever que la mejora del modelo en sí mismo es un proceso de investigación para lograr cada vez un modelo mejor que se ajuste más a las condiciones y necesidades de la evolución de la madurez que se vayan identificando luego de estudiar las mejores prácticas en la utilización del modelo para la evolución.
7. Con la información que dio origen al SLC-EModel, se puede cimentar el desarrollo de investigaciones con métodos inteligentes, el uso de algoritmos que aprenden, como el uso de redes neuronales artificiales (RNA) que aprendan de las configuraciones que se irán identificando en cada proceso de evaluación y evolución.
8. Si se dispone de la herramienta, una aplicación muy útil es identificar los perfiles de madurez y enseñar a una red inteligente cuáles son los comportamientos lógicos de los atributos en el sistema, para que más adelante, al integrar evaluaciones reales, se avance hacia estrategias más inteligentes de evolución. Estrategias similares a la propuesta en la investigación realizada, en las que, a partir de la evaluación y calificación de la madurez y de la realidad de la organización, se pueda estructurar un plan de mejoramiento para avanzar hacia el siguiente nivel.
9. Para la selección de la mejor opción de evolución, la más cercana a la realidad de la organización, se requiere del desarrollo de un modelo matemático que identifique dicha opción, partiendo de la calificación de la madurez y la capacidad de la organización para atender los requerimientos de avance de cada atributo en el modelo.
10. Estudiar la aplicación del SLC-EModel como una herramienta para referenciar la GPC con la utilización de LC entre organizaciones del sector.
11. Estudiar la aplicación del SLC-EModel como una herramienta para referenciar la GPC con la utilización de LC entre proyectos de la misma compañía.
12. Precisar los valores de las relaciones identificadas en el SEM, comparándolos con la obtención de datos reales. Esto permite entender la diferencia o similitud entre el modelo conceptual y el desempeño real de todas las relaciones en el sistema.
13. El SLC-EModel tiene involucrados diferentes submodelos que deben ser evidenciados para que el proceso de evolución permita revelar el desempeño de estos submodelos e integrarlos a las expectativas de evolución de la GPC. Por ejemplo, se vislumbran submodelos de calidad, seguridad en construcción, gestión ambiental y gestión con-

- tractual. Estos submodelos emergen del SLC-EModel y evolucionan en la medida en que el modelo principal evolucione.
14. Estudiar la aplicación del Last Planner System (LPS) para la planificación y control de la ejecución del SLC-EModel, así como el seguimiento de la implementación de la mejora del plan de acción de la evolución de la madurez de LC en la GPC.
 15. Desarrollar los índices de madurez de las categorías del modelo. Al nivel de categorías se construye un modelo de segundo orden y, si se desea conocer el IGM, este se construiría a partir de los índices de categoría, lo que daría origen a un modelo de tercer orden.
 16. Desarrollar una aplicación para la identificación de la mejor combinación de atributos. Encontrar una ruta con la menor cantidad de atributos a intervenir es una ruta conformada por las cargas factoriales y los valores de β que ofrecen mayores efectos en el alcance de la madurez. Esto puede implicar un proceso de optimización a partir de la economía del modelo para alcanzar rápidamente la madurez con la menor cantidad de atributos intervenidos.
 17. Este modelo puede ser adaptado a las necesidades de diferentes organizaciones de construcción, toda vez que el modelo es aplicable tanto a la madurez de Lean Construction en la GPC, como en la identificación de la madurez de procesos tanto de manufactura como de servicios en distintos entornos.
 18. Este modelo puede ser adaptado a las necesidades de la organización de construcción para responder a las particularidades del proceso de producción. Puede ser usado para evaluar una o todas las fases del desarrollo del proyecto.
 19. Ampliar la base de consulta a expertos con el fin de estudiar el comportamiento del modelo con un mayor número de datos.
 20. Estudiar la sostenibilidad de la implementación de LC en la GPC a partir del uso del SLC-EModel.

REFERENCIAS

- Abdimomunova, L. y Valerdi, R. (2010). An organizational assessment process in support of enterprise transformation. *Information Knowledge Systems Management*, 9, 175–195. <https://doi.org/10.3233/IKS-2010-0165>
- Aiken, L. R. (1980). Content validity and reliability of single items or questionnaires. *Educational and Psychological Measurement*, 40(4), 955–959. <https://doi.org/10.1177/001316448004000419>.
- Aiken, L. R. (1985). Three Coefficients for Analyzing the Reliability and Validity of Ratings. *Educational and Psychological Measurement*, 45(1), 131-142.
- Alarcón, L. F., Diethelm, S., Rojo, O., Calderón, R. (2005, July 19-21). Assessing the impacts of implementing Lean Construction. In *13th International Group for Lean Construction Conference, IGLC 13* (pp. 387–393). Sydney, Australia. https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_6e3d60139f8fc2f19M64312061377553&database=cpx
- Almeida, J. C. y Salazar, G. F. (2003, July 22-24). Strategic Issues in Lean Construction. In *11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Virginia, USA. <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-bad591f4-65d5-4484-b3a7-e98aa97ff354.pdf>
- AlSehaimi, A., Koskela, L. y Tzortzopoulos, P. (2013, October). Need for alternative research approaches in construction management: Case of delay studies. *Journal of Management in Engineering*, 29(4), 407–413. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000148).
- Anaman, K. A. y Osei-Amponsah, C. (2007). Analysis of the causality links between the growth of the construction industry and the growth of the macro-economy in Ghana. *Construction Management and Economics*, 25(9), 951–961. <https://doi.org/10.1080/01446190701411208>
- Andersen, E. S. y Jessen, S. A. (2003). Project maturity in organisations. *International Journal of Project Management*, 21(6), 457–461. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00088-1)
- Anderson, J. C. y Gerbing, D. W. (1984). The effect of sampling error on convergence, improper solutions, and goodness-of-fit indices for maximum likeli-

- hood confirmatory factor analysis. *Psychometrika*, 49(2), 155–173. <https://doi.org/10.1007/BF02294170>
- Arroyo, A. y Guirette, O. A. (2011, octubre 12-14). *El pensamiento sistémico y la construcción del conocimiento en organizaciones educativas*. Primer Congreso Latinoamericano de Ciencias Sociales: Los retos políticos, económicos y sociales de Latinoamérica en el siglo XXI [ponencia]. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Ayarkwa, J., Agyekum, K., Adinyira, E. y Osei-Asibey, D. (2011, July 31 - August 2). Barriers to successful implementation of Lean Construction in the Ghanaian building industry. In *Proceedings 6th Built Environment Conference*. Johannesburg, South Africa. ISBN: 978-0-86970-713-5
- Aziz, R. F. y Hafez, S. M. (2013). Applying lean thinking in construction and performance improvement. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 679–695. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.008>
- Bakås, O., Givaert, T. y Van Landeghem, H. (2011). Challenges and Success Factors for Implementation of Lean Manufacturing in European Smes. *Mitip 2011*, (11). <https://biblio.ugent.be/publication/1929995>
- Ball, M., y Wood, A. (1995). How many jobs does construction expenditure generate? *Construction Management and Economics*, 13(4), 307–318.
- Ballard, G. (2000). *The Last Planner System of Production Control* [Doctoral dissertation, The University of Birmingham]. e-theses repository. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4789/1/Ballard00PhD.pdf>
- Ballard, G. (2000). Lean Project Delivery System. *Lean Construction Institute. White Paper* (8), 1–7. <http://www.leanconstruction.org/pdf/WP8-LPDS.pdf>
- Ballard, G. (2008). The Lean Project Delivery System: An Update. *Lean Construction Journal*, 2008 Issue, 1–19. https://www.leanconstruction.org/media/library/id53/The_Lean_Project_Delivery_System_An_Update.pdf
- Ballard, G. y Howell, G. (1994, September). *Implementing Lean Construction: improving downstream performance* [Paper presentation]. 2nd Annual Conference on Lean Construction, Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. https://www.researchgate.net/publication/306120318_Implementing_lean_construction_Improving_downstream_performance.
- Ballard, G. y Howell, G. A. (2003, March 19-21). Competing Construction Management Paradigms. In *Construction Research Congress, Winds of Change: Integration and Innovation in Construction. Proceedings of the Congress*. Honolulu, Hawaii. https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_fabe9fcb77f0aaeM77de19255120119&database=cpx
- Ballard, G. y Tommelein, I. (2012, March-June). Lean management methods for complex projects. *The Engineering Project Organization Journal*, 2(1–2), 85–96. <https://doi.org/10.1080/21573727.2011.641117>

- Barahona, J. H. (1988). La empresa como organizacion: una propuesta de delimitación de su concepto. *Anales de Estudios Económicos y Empresariales*, (3), 225–238. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=785516>
- Baron, R. M. y Kenny, D. A. (1986, January). The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 51(6), 1173–1182. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.51.6.1173>
- Bashir, A. M., Suresh, S., Proverbs, D. y Gameson, R. (2011, September 5-7). *A critical, theoretical, review of the impacts of lean construction tools in reducing accidents on construction sites*. In Egbu, C. and Lou, E. C. W. (Eds.). Proceedings of the 27th Annual ARCOM (Association of Researchers in Construction Management) Conference, Bristol, UK, 249–258. http://www.arcom.ac.uk/-docs/proceedings/ar2011-0249-0258_Bashir_Suresh_Proverbs_Gameson.pdf
- Bashir, A. M., Suresh, S., Proverbs, D. y Gameson, R. (2010, June 25). Barriers towards the sustainable implementation of lean construction in the United Kingdom construction organisations. In *Arcom Doctoral Workshop. Sustainability Strategies in Construction*, University of Wolverhampton, UK. <https://www.arcom.ac.uk/-docs/workshops/2010-Wolverhampton.pdf>
- Becker, J., Knackstedt, R. y Pöppelbuß, J. (2009). Developing Maturity Models for IT Management. *Business & Information Systems Engineering*, 1(3), 213–222. <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- Bellini, D. (2003, julio). Las instancias metodológicas en la investigación comunicacional. *Punto Cero*, 8(7), 79-87. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762003000200013
- Bernstein, H. y Jones, S. (Eds.). (2013). *Lean construction: Leveraging collaboration and advanced practices to increase project efficiency*. SmartMarket Report. McGrawHill Construction. https://www.leanconstruction.org/media/docs/Lean_Construction_SMR_2013.pdf
- Bertelsen, S. (2004, October). Lean Construction: where are we and how to proceed? *Lean Construction Journal*, 1(1), 46–69. https://www.leanconstruction.org/media/docs/lcj/V1_N1/LCJ_04_0009.pdf
- Bertelsen, S. (2017). *The Unruly Project* (G. Ballard, Ed., 1st edition in English). Sven Bertelsen aps..
- Bon, R. (1992). The future of international construction: secular patterns of growth and decline. *Habitat International*, 16(3), 119–128. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/019739759290068A>
- Botero B., L. F. (2000). *Construcción de edificaciones*. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.
- Briede, J. C. y Rebolledo, A. (2010). Nuevos modelos para la innovación en el diseño conceptual de productos : “Mapa del estado del arte de la propuesta

- conceptual". *Theoria*, 19(1), 31–39. <http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v19-1/2.pdf>
- Britten, N. (1995, July 22). Qualitative Research: Qualitative interviews in medical research. *BMJ*, 311(251). <https://doi.org/10.1136/bmj.311.6999.251>
- Calderón, C. (2002, septiembre-octubre). Criterios de calidad en la investigación cualitativa en salud (ICS): apuntes para un debate necesario. *Revista Española de Salud Pública*, 76(5), 473–482. <https://doi.org/10.1590/S1135-57272002000500009>
- Cano, S., Botero, L. y Rivera, L. (2017a). Evaluación del desempeño de Lean Construction. *Espacios*, 38(39), 17. <http://www.revistaespacios.com/a17v38n39/a17v38n39p30.pdf>
- Cano, S., Fajardo, M., Botero, L. y Rivera, L. (2015, octubre 7-9). Entornos y sistemas de producción en construcción. Relación con la evolución de la aplicación de Lean Construction en Colombia [ponencia]. 9º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, Inovação e Sustentabilidade (Sibragec 2015) y 6º Encontro Latino Americano de Gestão e Economia da Construção (Elagec 2015), Sibragec-Elagec 2015. Universidad de São Carlos, 7-9 de octubre, São Carlos, Brasil.
- Cano, S., Delgado, J., Botero, L. y Rubiano, O. (2015b). Study of Barriers and Success Factors in Lean Construction Implementation - Exploration in a Pilot Context. In O. Seppänen, V. González and P. Arroyo (Eds.), *IGCL 23. Global Problems - Global Solutions. Proceedings for the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Perth, 2015, (pp. 631–641). IGCL. <https://iglc.net/Content/Proceedings/IGLC-2015-Proceedings.pdf>
- Cano, S. y Rivera, L. (2015). Modelo sistémico de la madurez en la aplicación de Lean en la gestión de proyectos de construcción. *Sibragec Elagec 2015*, j649–656. http://www.infohab.org.br/sibraelagec2015/artigos/SIBRAGEC-ELAGEC_2015_submission_82.pdf
- Carro Paz, R. y González Gómez, D. (2012). *El sistema de producción y operaciones*. [Recurso de aprendizaje]. Centro de Documentación Nulan, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. <http://nulan.mdp.edu.ar/id/eprint/1606>
- Carvalho, B. S. de. (2008). *Proposta De Uma Ferramenta De Análise E Avaliação Das Construtoras Em Relação Ao Uso Da Construção Enxuta*. Universidade Federal Do Paraná - UFPR.
- Castka, P., Bamber, C. J. y Sharp, J. M. (2004, december 1). Benchmarking intangible assets: enhancing teamwork performance using self-assessment. *Benchmarking: An International Journal*, 11(6), 571–583. <https://doi.org/10.1108/14635770410566483>
- Chiavenato, I. (2008). *Gestión del talento humano*. (Tercera Ed.). México D. F.: McGraw-Hill.

- Ciborra, C. U. y Hanseth, O. (1998). "From tool to *Gestell*: Agendas for managing the information infrastructure". *Information Technology & People*, 11(4), 305–327. <https://doi.org/10.1108/09593849810246129>
- Cortez, D., Cortez, K., García, G. y Rodríguez, M. (2009). Factores determinantes en la implementación de Lean Manufacturing utilizando teoría psicosocial: caso aplicado en una empresa del sector acerero en Nuevo León. *Innovaciones de Negocios*, 6(12), 173–188. <http://revistainnovaciones.uanl.mx/index.php/revin/article/view/225/210>
- Costa Neto, E. N., Sartori Filho, H., Santiago, M. V, dos Santos, P. R., Santana, P. L. y da Silva, R. B. (2015). Evaluation of the use of the principles of lean construction in two companies in the construction sector in the municipality of Rondonópolis-MT. *Espacios*, 36(19), 11.
- Creswell, J. W. (2013). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4.^a ed.). Sage Publications.
- Cronbach L J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests*, *Psychometrika* 16(3), 297–334.
- Crosby, P. (1979). *Quality is Free. The Art of Making Quality Certain*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Crosthwaite, D. (2000). The global construction market: a cross-sectional analysis. *Construction Management & Economics*, 18(5), 619–627. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014461900407428>
- Cruz, H. y Santos, D. (2015). Investigação do comportamento enxuto de empresas construtoras de m dio porte. In *Sibragec Elagec 2015, Sao Carlos, Brasil 7 a 9 de outubro*. Sao Carlos.
- Cupani, M. (2012). Análisis de ecuaciones estructurales: conceptos, etapas de desarrollo y un ejemplo de aplicación. *Revista Tesis*, 136–156.
- Curtis, B., Hefley, B. y Miller, S. (2009). *People Capability Maturity Model (P-CMM) Version 2.0*. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon Software Engineering Institute. [https://doi.org/Report CMU/SRI-2001-MM-001](https://doi.org/Report%20CMU/SRI-2001-MM-001)
- Curtis, B., Hefley, W., y Miller, S. (2001). *People Capability Maturity Model® (P-CMM®)*. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon Software Engineering Institute.
- De Carvalho, F. (2012). *Avalia o da Aplica o dos Princípios da Constru o Enxuta em Empresas Construtoras*. Universidade Federal de Sao Carlos
- Despradel, I., Guerrero, C., Jourdain, M., López, J., Nuñez, A. y Oliver, C. (2011). Lean Construction: implicaciones en el uso de una nueva filosofía, con miras a una mejor administración de proyectos de Ingeniería Civil en República Dominicana. *Nineth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development*, (1993), 1–8.

- Diekmann, J. E., Krewedl, M., Balonick, J., Stewart, T. y Won, S. (2004). Application of Lean Manufacturing Principles to Construction,(2004) Under the Guidance of Project Team Number 191. A Report toThe Construction Industry Institute The University of Texas at Austin.
- Dwyer, F. R., y Oh S. (1987). Output Sector Munificence Effects on the Internal Political Economy of Marketing Channels. *Journal of Marketing Research*, 24(4), 347–358. <https://doi.org/10.2307/3151382>
- Easterby-Smith, M., Thorpe, R. y Loewe, A. (1991). *Management research : an introduction*. London: Sage.
- Ehsan, N., Perwaiz, A., Arif, J., Mirza, E. y Ishaque, A. (2010). CMMI/SPICE based process improvement. *5th IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology, ICMIT2010*, 859–862. <https://doi.org/10.1109/ICMIT.2010.5492803>
- Elbeltagi, E. y Eng, P. (2009). *Lecture Notes on Construction Project Management*. Mansoura University, Faculty of Engineering. https://www.researchgate.net/publication/228397722_LECTURE_NOTES_ON_CONSTRUCTION_PROJECT_MANAGEMENT
- Ellis, T. J. y Levy, Y. (2010). A Guide for Novice Researchers: Design and Development Research Methods. In *Proceedings of Information Science & IT Education Conference* (pp. 107–118). https://www.researchgate.net/publication/228411189_A_Guide_for_Novice_Researchers_Design_and_Development_Research_Methods
- Etges, B., Saurin, T. y Bulhões, I. R. (2013). A protocol for assessing the use of lean construction practices. *Proceedings for the 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (Lc), 93–102. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84903286965&partnerID=tZotx3y1>
- Fearne, A. y Fowler, N. (2006). Efficiency versus effectiveness in construction supply chains: The dangers of “lean” thinking in isolation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 11(4), 283–287. <https://doi.org/10.1108/13598540610671725>
- Fisher, J. (2005). *Cómo incentivar a los empleados*. Red Summa. Red Universitaria Virtual Internacional. Editorial Kogan Page. ISBN:9780749443962
- Forbes, L. H. y Ahmed, S. M. (2011). *Modern Construction. Lean Project Delivery and Integrated Practices* (1st Edition). Boca Raton, Fl.: CRC Press, Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b10260>
- Forcada Matheu, N. (2005). *Life Cycle Document Management System for Construction*. [Tesi doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya] UPCCommons-Portal del coneixement obert de la UPC. <http://hdl.handle.net/2117/93472>, <https://www.tdx.cat/TDX-0518105-155912>

- Formoso, C. T., Sommer, L., Koskela, L. y Isatto, E. L. (2011, July). An Exploratory Study on the Measurement and Analysis of Making-Do in Construction Sites. *Iglc-19*, 236–246. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4753.1043>
- Ganesan, S. (2000). *Employment Technology and Construction Development*. Asgate Publishing. ISBN 13: 978-1-138-73607-8 (hbk)
- Garay-Hernández, R., Espinoza, A., Martínez, A. y Castro-Careaga, L. (2013). Estudio de mapeo sistematizado sobre la estimación de valor del producto *software*. En *Congreso Internacional de Investigación e Innovación en Ingeniería de Software 2013. Xalapa, Veracruz, del 2 al 4 de octubre*. (pp. 138–145). https://www.researchgate.net/publication/265335220_Estudio_de_Mapeo_Sistematizado_sobre_la_Estimacion_de_Valor_del_Producto_Software
- García, J. L. (2011, septiembre). Factores relacionados con el éxito del mantenimiento productivo total *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (60), 129–140. <https://www.redalyc.org/pdf/430/43021583012.pdf>
- Gill, T. G. y Hevner, A. R. (2013). A Fitness-Utility Model for Design Science Research. *ACM Transactions on Management Information Systems*, 4(2), 1–24. <https://doi.org/10.1145/2499962.2499963>
- Gitlow, H. S. y Loredó, E. N. (1992). Total quality management at Florida Power & Light Company: A case study. *Quality Engineering*, 5(1), 123–158. <https://doi.org/10.1080/08982119208918956>
- Glazer, H., Dalton, J., Anderson, D., Konrad, M. y Shrum, S. (2008). *CMMI® or Agile : Why Not Embrace Both !* (Technical Note CMU/SEI-2008-TN-003). Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute. <https://doi.org/10.1109/AGILE.2006.30>
- Goksen, Y., Cevik, E. y Avunduk, H. (2015). A Case Analysis on the Focus on the Maturity Models and Information Technologies. *Procedia Economics and Finance*, 19, 208–216. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00022-2)
- González, V., Alarcón, L. F. y Molenaar, K. (2009, March). Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects. *Automation in Construction*, 18(2), 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.005>
- Green, S. D., Harty, C., Elmualim, A. A., Larsen, G. D., y Kao, C. C. (2008, august 14). On the discourse of construction competitiveness. *Building Research and Information*, 36(5), 426–435. <https://doi.org/10.1080/09613210802076666>
- Gregor, S., y Jones, D. (2007). The Anatomy of a Design Theory. *Journal of the Association for Information Systems*, 8(5), 312–335.
- Guo, H. (2009). *Rethinking construction project management using the VP-based manufacturing management model* [Doctoral dissertation, The Hong Kong Polytechnic University], 185.

- Haenlein, M., y Kaplan, A. M. (2004). A Beginner's Guide to Partial Least Squares Analysis. *Understanding Statistics*, 3(4), 283–297. https://doi.org/10.1207/s15328031us0304_4
- Hair, J. F. y Anderson, R. E. (1992). *Multi-variate Data Analysis With Readings*. (W. C. Black, Ed.) (3rd Ed.). New York: Macmillan.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. y Black, W. (1995). *Análisis Multivariante* (4.ª edición). Madrid: Prentice-Hall Iberia.
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L. y Black, W. (1999). *Análisis Multivariante* (5.ª edición). Madrid: Prentice-Hall Iberia.
- Hamzeh, F. R., Morshed, F. A., Jalwan, H. y Saab, I. (2012). Is improvisation compatible with look ahead planning? An exploratory study. *IGLC 2012 - 20th Conference of the International Group for Lean Construction*. https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_535b5813d5a768c97M-4b0a2061377553&database=cpx
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª edición). México D. F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Hevner, A. R. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2), 6.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J. y Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hodkinson, P. y Hodkinson, H. (2001, december 5-7). The strengths and limitations of case study research [Paper presentation] *Learning and Skills Development Agency conference "Making an Impact on Policy and Practice"*, Cambridge. http://education.exeter.ac.uk/tlc/docs/publications/LE_PH_PUB_05.12.01.rtf
- Hofacker, A., De Oliveira, B. F., Gehbauer, F., Freitas, M. D. C. D., Mendes Jr., R., Santos, A. y Kirsch, J. (2008). Rapid Lean Construction-quality Rating model (LCR). In *Proceedings of IGLC16: 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 16-18 July, 2008, Manchester, UK* (pp. 241–250). The International Group for Lean Construction. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84856651250&partnerID=tZOtx3y1>
- Holmström, J., Ketokivi, M., y Hameri, A. (2009, March 3). Bridging practice and theory: a design science approach. *Decision Sciences*, 40(1), 65–87. <https://doi.org/doi:10.1111/j.1540-5915.2008.00221.x>
- Howell, G. A. (1999). *What is Lean Construction* [Paper presentation]. Proceedings Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 26-28 July, 1999, University of California, Berkeley, CA. <https://>

- leanconstruction.org.uk/wp-content/uploads/2018/09/Howell-1999-What-Is-Lean-Construction-1999.pdf
- Huang, C., Liu, P. y Zhang, P. (2013). The Complexity Conceptual Model of Lean Construction. En E. Qi, J. Shen y R. Dou (Eds.), *Proceedings of 2013 4th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013)* (pp. 31-40). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-40060-5_4
- Humphrey, W. S. (2002, December). Three process perspectives: Organizations, teams, and people. *Annals of Software Engineering*, (14), 39–72. <https://doi.org/10.1023/A:1020593305601>
- Hwang, S. M. (2009). Process Quality Levels of ISO/IEC 15504 , CMMI and K-model. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 3(1), 33–42. <https://www.semanticscholar.org/paper/Process-Quality-Levels-of-ISO-%2F-IEC-15504-%2C-CMMI-Hwang/68a5f7b56dff2b9c9dbab79cfc4ad257f6917fe#paper-header>
- Ibbs, C. W., y Kwak, Y. H. (2000, March 1). Assessing Project Management Maturity. *Project Management Journal*, 31(1), 32–43. Ibbs, C. W., y Kwak, Y. H. (2000). Assessing Project Management Maturity. *Project Management Journal*, 31(1), 32–43. <https://doi.org/10.1177%2F875697280003100106>
- Ive, G., y Gruneberg, S. L. (2000). *The Economics of the Modern Construction Sector*. London: Palgrave MacMillan. <https://doi.org/10.1057/9780230510432>
- Jöreskog, K. G. y Sörbom, D. (1993). *Lisrel 8. Structural equation modelling with Simplis command language*. Chicago: Scientific Software International.
- Jørgensen, B. (2006). *Integrating Lean Design and Lean Construction: Processes and Methods* [Doctoral dissertation, The Technical University of Denmark]. DTU orbit. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/3141488/Jorgensen+2006+thesis+download+version.pdf>
- Grinnell, R. M. y Unrau, Y. (2005). *Social Work Research and Evaluation: Quantitative and Qualitative Approaches*. Oxford: Oxford University Press, New York: Cengage Learning.
- Jünge, G. H., Kjersem, K., Shlopak, M., Alfnes, E. y Halse, L. L. (2015). From First Planner to Last Planner. In S. Umeda, M. Nakano, H. Mizuyama, H. Hibino, D. Kiritsis y G. von Cieminski (Eds.) *Advances in Production Management Systems: Innovate Production Management Towards Sustainable Growth. AMPS 2015. IFIP International Federation for Information Processing Advances in Information and Communication Technology*, vol. 460 (pp. 240–247). New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_28
- Kahn, J.H. (2006, September 1). Factor Analysis in Counseling Psychology Research, Training, and Practice: Principles, Advances, and Applications. *The Counseling Psychologist*, 34(5), 684–718. <https://doi.org/10.1177/0011000006286347>

- Kaplan, D. (2000). *Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Kasanen, E., Lukka, K. y Siitonen, A. (Fall 1993). The Constructive Approach in Management Accounting Research. *Journal of Management Accounting Research*, (5), 243–264., https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/183797/mod_resource/content/1/Kasanen%20et%20al%201993.pdf
- Khoshgoftar, M. y Osman, O. (2009, September 11). Comparison of Maturity Models [Paper presentation]. *2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 8-11 August, Beijing, China* (297–301). <https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2009.5234402>
- Kim, D. y Park, H.-S. (2006). Innovative construction management method: Assessment of lean construction implementation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(6), 381–388. <https://doi.org/10.1007/bf02823976>
- Kim, Y.-W. y Dossick, C. S. (2011). What makes the delivery of a project integrated? A case study of Children’s Hospital, Bellevue. WA. *Lean Construction Journal*, 53-66. https://www.leanconstruction.org/media/library/id42/What_makes_the_delivery_of_a_project_integrated_A_case_study_of_Children’s_Hospital,_Bellevue,_WA.pdf
- Kirk, B. J. y Miller, M. L. (1986). *Reliability and Validity in Qualitative Research*. Beverly Hills, CA: Sage Publications.
- Kline, R. B. (2011). *Methodology in the Social Sciences. Principles and practice of structural equation modeling*. (Third Edit.,). New York: Guilford Press.
- Kock, N. y Lynn, G. (2012, September). Lateral Collinearity and Misleading Results in Variance-Based SEM: An Illustration and Recommendations. *Journal of the Association for Information Systems*, 13(7), 546–580. DOI: 10.17705/1jais.00302
- Kock, N. (2017). *WarpPLS User Manual: Version 6.0*. Laredo, Texas USA: ScriptWarp Systems. http://cits.tamtu.edu/WarpPLS/UserManual_v_6_0.pdf#page=77
- Kock, N. y Gaskins, L. (2014). The Mediating Role of Voice and Accountability in the Relationship Between Internet Diffusion and Government Corruption in Latin America and Sub-Saharan Africa. *Information Technology for Development*, 20(1), 23–43. <https://doi.org/10.1080/02681102.2013.832129>
- Koehn, E. y Brown, G. (1986, June 1). International Labor Productivity Factors. *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(2), 299–302. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9364%281986%29112%3A2%28299%29>
- Koskela, L. y Ballard, G. (2012). Is production outside management? *Building Research & Information*, 40(6), 724–737. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.709373>

- Koskela, L. (1992, August). *Application of the New Production Philosophy To Construction* (CIFE Technical Report # 72, Stanford University). <https://www.leanconstruction.org/media/docs/Koskela-TR72.pdf>
- Koskela, L. (2000, May 19). *An Exploration towards a Production Theory and its Application to Construction*. Construction [Doctoral dissertation, VTT Technical Research Centre of Finland]. VTT Publications 408. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/publications/2000/P408.pdf>
- Koskela, L. (2004). Making-do - The eighth category of waste [Paper presentation]. *Proceedings of the 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 3-5 August, Helsingør, Denmark*. . <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-1c44f438-33a5-4d8f-84d3-ae7fab7ed164.pdf>
- Koskela, L. (2008). Which kind of science is construction management? In *Proceedings for the 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, July 16-18, 2008, Manchester, UK* (pp. 51–60). Manchester: The University of Salford. <http://usir.salford.ac.uk/9362/>
- Koskela, L. y Howell, G. (2008). The underlying theory of project management is obsolete. *IEEE Engineering Management Review*, 36(2), 22–34. <https://doi.org/10.1109/EMR.2008.4534317>, <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isnumber=4534150&punumber=46>
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G. y Tommelein, I. D. (2002). The foundations of lean construction. In *Design and Construction: Building in Value* (pp. 211–226). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann Ltd., <http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/598>
- Kvale, S. (2007). *Doing Interviews*. Thousand Oaks, CA,: Sage Publications.
- Liker, J. K. (2011). *Toyota. Cómo el fabricante más grande del mundo alcanzó el éxito*. Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- Limon, D. H_ (2015). *Measuring Lean Construction - A Performance measurement model supporting the implementation of Lean practices in the Norwegian construction industry*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2351233/13187_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Liu, M., Ballard, G. y Ibbs, W. (2011, October). Work Flow Variation and Labor Productivity: Case Study. *Journal of Management in Engineering*, 27(4), 236–242. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000056)
- Lowe, J. (2003). *Construction Economics*. www.callnetuk.come/home/john-low70/
- Lukka, K. (2003). The Constructive Research Approach. En: L. Ojala y O-P. Himola (Eds.) *Case study research in logistics* (pp.83-101). Publications of the Turku School of Economics and Business Administration. https://www.researchgate.net/publication/247817908_The_Constructive_Research_Approach.

- Maloney, W. (1983, September 1). Productivity Improvement: The Influence of Labor. *Journal of Construction Engineering and Management*, 109(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1983\)109:3\(321\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1983)109:3(321))
- Mann, D. (2005). *Creating a Lean Culture: Tools to Sustain Lean Conversions*. New York: Productivity Press. <https://irp-cdn.multiscreensite.com/2e31c66b/files/uploaded/01%20Lean%20Culture1.pdf>
- Mano, A., Lima, E. P. de, Costa, S. E. G. da y Cano, S. (2018, July 7). Use of the Lawshe technique to validate the questionnaire items on barriers that impede the implementation of Lean Construction (Identifying critical barriers to implementing Lean Construction using a Lawshe study). In *Proceedings of the International Conference on Production Research-ICPR Americas Region, The 9th International Conference on production research- Americas 2018*, July 7-8, Bogotá. <https://icpramericas2018.wixsite.com/icpr/conference-proceedings>
- Manson, N. J. (2006). Is operations research really research ? *Orion*, 22(2), 155–180. <https://doi.org/10.5784/22-2-40>
- March, S. T. y Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4), 251–266. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)
- March, S. T., y Storey, V. C. (2008, December). Design Science in the information systems discipline: An Introduction to Special Issue on Design Science Research. *MIS Quarterly*, 32(4), 725–730.
- Martínez, P., González, V. y Fonseca, E. (2009, abril). Integración conceptual Green-Lean en el diseño, planificación y construcción de proyectos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(1), 5–32. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000100001&lang=pt
- McClinton, P. (2007). Project Management Methodologies: A Review of the Literature. https://www.academia.edu/7055300/Project_Management_Methodologies_A_Review_of_the_Literature
- McCormack, K. y Lockamy, A. (2004, September). The development of a supply chain management process maturity model using the concepts of business process orientation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 9(4), 272–278. <https://doi.org/10.1108/13598540410550019>
- Meredith, J. (1993, May). Theory Building through Conceptual Methods. *International Journal of Operations & Production Management*, 13(5), 3–11. <https://doi.org/10.1108/01443579310028120>
- Miltenburg, J. (1995). *Manufacturing Strategy*. Portland: Productivity Press.
- Moorman, C. y Miner, A. S. (1998, October). Organizational Improvisation and Organizational Memory. *The Academy of Management Review*, 23(4), 698–723. <https://faculty.fuqua.duke.edu/~moorman/Publications/AMR1998.pdf>

- Mossman, A. (2009). Creating value: a sufficient way to eliminate waste in Lean Design and Lean Production. *Lean Construction Journal* , 13–23. https://www.leanconstruction.org/media/docs/lcj/2009/LCJ_08_009.pdf
- Mossman, A., Ballard, G. y Pasquire, C. (2010). *Lean Project Delivery - innovation in integrated design and delivery*. https://www.researchgate.net/publication/264829692_Lean_Project_Delivery_-_innovation_in_integrated_design_delivery
- Mossman, A. (2018). What Is Lean Construction- Another Look - 2018. En V. A. González (Ed.). *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGCL, July 18-20, Chennai, India*, 1240–1250. <https://doi.org/10.24928/2018/0309>
- Myšková, R. (2009). Satisfaction of Financial Managers with Accounting Information System. In *Advances in marketing, management and finances: Proceedings of the 3rd International Conference on Management, Marketing and Finances, April 30 - May 2, Houston*, 76–81. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/houston/AMMF/AMMF10.pdf>
- Nam, C. H., y Tatum, C. B. (1988). Major characteristics of constructed products and resulting limitations of construction technology. *Construction Management & Economics*, 6(2), 133-147. <https://doi.org/10.1080/01446198800000012>. [Published online: 28 July 2006]
- Nesensohn, C, Bryde, D., Ochieng, E. y Fearon, D. (2014). Maturity and maturity models in Lean Construction. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 14(1), 45–59. <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84897054944&partnerID=40&md5=fcd6fa0c6b2b15ac7349293f5b40c246>
- Nesensohn, C. (2014). *An innovative framework for assessing lean construction maturity*. [Doctoral dissertation, Liverpool John Moores University]. Ethos, e-theses online service. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.602630>, <http://researchonline.ljmu.ac.uk/id/eprint/4320/>
- Nesensohn, C. y Bryde, D. J. (2012). A Review of the Evolution of Lean Construction. In M. Hadju y M. J. Skibniewski (Eds.). *Proceedings Creative Construction Conference 2012, June 30 - July 3, Budapest, Hungary*, (pp. 468–476). Budapest, Hungary: Szent István University. http://www.onl.eu/sites/default/files/files/CC2012_Proceedings.pdf
- Newsom, J. T. (2015). *Longitudinal Structural Equation Modeling A Comprehensive Introduction*. New York: Routledge.
- Niglas, K. (2010). *The multidimensional model of research methodology: an integrated set of continua*. In A. Tashakkori y C. Teddlie, (Eds.). *Sage handbook of mixed methods research* (pp. 215-236). Thousand Oaks, CA.: Sage Publications Ltd.

- Noreña, A. L., Alcaraz M., N., Rojas, J. G. y Rebolledo M., D. (2012). Aplicabilidad de los criterios de rigor y éticos en la investigación cualitativa. *Aquichan*, 12(3), 263–274. <https://aquichan.unisabana.edu.co/index.php/aquichan/article/view/1824>
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric theory* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill
- Nunnally, J. C. y Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric Theory* (3rd. ed.). New York: Mcgraw-Hill Inc.
- Ogunbiyi, O., Oladapo, A. y Goulding, J. (2011). Innovative value management: Assessment of Lean Construction implementation. In Ruddock, L. y Chynoweth, P. (Eds.). *COBRA 2011 - Proceedings of RICS Construction and Property Conference, September 12-13, University of Salford, Salford, UK* (pp. 696–709). Salford, UK: University of Salford. https://vbn.aau.dk/ws/files/65750085/COBRA_proceedings.pdf#page=697
- Ogunbiyi, O., Oladapo, A., Goulding, J., Oyedolapo, O., Jack Steven, G. y Adebayo, O. (2014). An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, 14(1), 88–107. <https://doi.org/10.1108/CI-08-2012-0045>
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Portland, Or.: Productivity Press.
- Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics*, 85(3), 319–329. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00119-1)
- Páez, H., Vargas, H., Ramírez, L. (2013). Lean construction philosophy difussion: The Colombian case. In Formoso, C. T. y Tzortzopoulos, P. (Eds.). *Proceedings of the 21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction 2013, IGLC 2013, July 31 - August 2, Fortaleza, Brazil* (pp. 1007–1015). The International Group for Lean Construction. <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-d4c1c3f6-4842-41b3-ac19-74c7cd262149.pdf>
- Paulk, M., Curtis, B., Chrissis, M. B., y Weber, C. V. (1996). The Capability Maturity Model for Software. In M. Dorfman y R. H. Thayer (Eds.). *Software Engineering* (pp. 427-438). Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press.
- Pavez, I. y Alarcón, L. F. (2012). The Lean Construction Professional's Profile (LCPP): Implementation in Chilean Contractor Organizations. *Global Perspective on Engineering Management*, 1(3), 59-66.
- Pavez, I. y Alarcón, L. F. (2007). Lean construction professional's profile (lcpp): Understanding the competences of a Lean Construction professional. In Pasquire, C. L. y Tzortzopoulos, P. (Eds.). *Lean Construction: A New Paradigm for Managing Capital Projects. 15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, July 18-20, East Lansing, Michigan* (pp. 453–464). The

- International Group for Lean Construction. <https://iglc.net/Papers/Details/516>, <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-57749085002&partnerID=tZOtx3y1>
- Pavez, I. y Alarcón, L. F. (2006). Qualifying people to support lean construction in contractor organizations. In *Understanding and Managing the Construction Process: Theory and Practice - Proceedings of the 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-14, July 25-27, Santiago de Chile* (pp. 513–524). The International Group for Lean Construction. *Understanding and Managing the Construction Process: Theory and Practice - 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-14* (pp. 513–524) <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-3621a73f-afaf-4f9c-9848-e648118103b9.pdf>, <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84866139994&partnerID=tZOtx3y1>
- Pavez, I., González, V. y Alarcón, L. F. (2010). Improving the Effectiveness of New Construction Management Philosophies using the Integral Theory. *Revista de la Construcción*, 9(1), 26–38. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2010000100004>
- Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. y Chatterjee, A. S. (2008). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45–77. <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302> [Published online: 8 December 2014].
- Perkins, L. N., Abdimomunova, L., Valerdi, R., Shields, T. y Nightingale, D. (2010). Insights from enterprise assessment: How to analyze LESAT results for enterprise transformation. *Information Knowledge Systems Management*, 9(3-4), 153–174. <https://doi.org/10.3233/IKS-2010-0164>
- Petty, N. J., Thomson, O. P., y Stew, G. (2012). Ready for a paradigm shift? Part 1: Introducing the philosophy of qualitative research. *Manual Therapy*, 17(4), 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.math.2012.03.006>
- Piirainen, K. A., y González, R. A. (2013). Constructive Synergy in Design Science Research: A Comparative Analysis of Design Science Research and the Constructive Research Approach. *Nordic Journal of Business*, 62(3–4), 206–234. http://njb.fi/wp-content/uploads/2015/05/lta_2013_03-4_a3.pdf, https://doi.org/10.1007/978-3-642-38827-9_5
- Pons, J. F. (2014). *Introducción a Lean Construction*. Madrid: Fundación Cultural de la Construcción. <http://www.juanfelipepons.com/wp-content/uploads/2017/02/Introduccion-al-Lean-Construction.pdf>
- Project Management Institute, PMI. (2004). *Guía de los fundamentos de la dirección de proyectos: Guía del PMBOK*. Newton Square, PA: Project Management Institute. https://www.academia.edu/23518988/Fundamentos_de_la_Dirección_de_Proyectos

- Ramírez, J. M. (2009). Planeación de la implantación de sistemas de información en las PYME mexicanas [presentación]. *Primer Congreso Internacional en México sobre la MIPYME: el Impacto de la investigación académica en el desarrollo de la MIPYME, 1-3 de septiembre de 2009, Universidad Nacional Autónoma de Pachuca, Pachuca, Hidalgo.* <https://es.slideshare.net/jmramireza/planeacin-de-la-implantacin-de-sistemas-de-informacin-en-las-pyme-mexicanas>
- Rangelova, F. (2015). *Fundamentals of Economics in Sustainable Construction*. Sofia, Bulgaria: Bultest Standard Ltd.
- Remenyi, D., Williams, B., Money, A. y Swartz, E. (1998). *Doing Research in Business and Management: An Introduction to Process and Method*. London: Sage Publications.
- Rindskopf, D. y Rose, T. (1988). Some Theory and Applications of Confirmatory Second-Order Factor Analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 23(1), 51-67. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr2301_3
- Ritchie, J. y Spencer, L. (1994). Qualitative data analysis for applied policy research. In A. Bryman y R. G. Burgess (Eds.), *Analysing qualitative data* (pp. 173-194). London: Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203413081_chapter_9
- Rivera, L. y Manotas, D. (2014). Performance Measurement in Lean Manufacturing Environments. In J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías, y G. Cortes-Robles (Eds.), *Lean Manufacturing in the Developing World: Methodology, Case Studies and Trends from Latin America* (pp. 445-460). Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04951-9>
- Rivera, L. (2016). *La madurez de LC*. Sandra Cano/Entrevistadora. Cali.
- Rocha, C. G. da, Formoso, C. T., Tzortzopoulos-Fazenda, P., Koskela, L. y Tezel, A. (2012, July 18-20). Design science research in lean construction: process and outcomes. In Tommelein, I. D. y Pasquire, C. L. (Eds.). *Proceedings of the 20th Annual Conference of The International Group For Lean Construction, July 18-20, San Diego, CA.* <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-9ba27a43-dbef-443c-a3ca-d95b4b6ab8c3.pdf>
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A. y Owen, R. (2010, September). Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968-980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)
- Sainath, Y., Koshy, V. y Raghavan, N. (2018). Framework for Progressive Evaluation of Lean Construction Maturity Using Multi-Dimensional Matrix [Paper presentation]. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the International.*

- Group for Lean Construction (IGLC) July 18-20, Chennai, India* (pp. 370–380). <https://doi.org/10.24928/2018/0416>
- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A. y Minkarah, I. (2006, October). Lean construction: From theory to implementation. *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168–175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2006\)22:4\(168\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2006)22:4(168))
- Salem, O. y Zimmer, E. (2005, October). Application of Lean Manufacturing principles to construction. *Lean Construction Journal*, 2(2), 51–54. Retrieved from http://www.leanconstruction.org/media/docs/lcj/V2_N2/LCJ_05_011.pdf
- Salvatierra, J. L., Alarcón, L. F., López, A. y Velásquez, X. (2015, July). Lean Diagnosis for Chilean Construction Industry: Towards More Sustainable Lean Practices and Tools. In O. Seppänen, V. González y P. Arroyo (Eds.). *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, July 29-31, Perth, Australia* (pp. 642-651).. <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-2cfcc2f3-3def-4023-a908-09eff2752f20.pdf>
- Sarhan, S., y Fox, A. (2013a). Barriers to implementing lean construction in the UK construction industry. *The Build & Human Environment Review*, 6, 1–17. <http://eprints.lincoln.ac.uk/id/eprint/28877/1/81-233-1-PB.pdf>
- Sarhan, S. y Fox, A. (2013b). Performance measurement in the UK construction industry and its role in supporting the application of Lean Construction concepts. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 13(1), 23–35. <https://epress.lib.uts.edu.au/index.php/AJCEB/issue/view/268>, <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84875155726&partnerID=40&md5=b9ddd7669a0caf3c26e7883099c4d797>
- Sarhan, S. y Fox, A. (2012, July). Trends and challenges to the development of a lean culture among uk construction organisations. In I. D. Tommelein y C. L. Paquire (Eds.). *IGLC 2012 - Proceedings of the 20th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, July 18-20, San Diego, CA* . <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-2b2e156c-b290-499c-b06c-84ef0918b14b.pdf> Sarshar, M., Haigh, R., Finnemore, M., Aouad, G., Barrett, P., Baldry, D. y Sexton, M. (2000, March 1). Spice: A business process diagnostics tool for construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7(3), 241–250. <https://doi.org/10.1108/eb021149>
- Šatanová, A. y Krajčirová, L. (2012). Application of Accounting and Reporting in a Cost-Oriented Quality Management in Wood- Processing Companies. *Drvna Industrija: Scientific Journal of Wood Technology*, 63(4), 283–289. <https://doi.org/10.5552/drind.2012.1215>
- Schöttle, A. (2015, September 15) What is the lean project delivery system? *Lean Construction Blog*. <https://leanconstructionblog.com/What-is-the-lean-project-delivery-system.html>

- Senge, P. M., Klieiner, A., Roberts, C., Ross, R. B. y Smith., B. J. (1994). *The Fifth Discipline Fieldbook: Strategies and Tools for Building a Learning Organization*. New York, NY, USA: Currency Doubleday.
- Shang, G. (2013, January 15). The Toyota way model: an implementation framework for large chinese construction firms [Doctoral dissertation. National University of Singapore]. ScholarBank@NUS Repository. <http://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/43610>
- Shang, G. y Pheng, L. (2012, September 21). The adoption of Toyota Way principles in large Chinese construction firms. *Journal of Technology Management in China*, 7(3), 291–316. <https://doi.org/10.1108/17468771311325185>
- Shehu, Z., y Akintoye, A. (2010). Major challenges to the successful implementation and practice of programme management in the construction environment: a critical analysis. *International Journal of Project Management*, 28(1), 26–39. [http://celesteng.mis.yzu.edu.tw/im307/resources/PM%20reports%20\(2011\)/PM%20ref%20papers%202011/challenges%20to%20successful%20implementation%20n%20practice%20of%20program%20mm.pdf](http://celesteng.mis.yzu.edu.tw/im307/resources/PM%20reports%20(2011)/PM%20ref%20papers%202011/challenges%20to%20successful%20implementation%20n%20practice%20of%20program%20mm.pdf)
- Shingo, S. (1992). *The Shingo production management system: improving process functions*. Tokio, Japan: Productivity Press.
- Simon, H. (1996). *The Science of the Artificial* (Third edition). Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press.
- Siriwardena, M. L., Kagioglou, M., Jeong, K. S., Haigh, R. y Amaratunga, R. D. G. (2005, April). Spice 3: Facilitating organizational process improvement through good practice sharing. In *2nd International Symposium, April 2005, University of Salford, UK* (pp. 434–448). University of Huddersfield Repository.. http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/22707/1/271_Siriwardena_ML_SPICE_3_FACILITATING_ORGANISATIONAL_PROCESS_IMPROVEMENT_THROUGH_GOOD_PRACTICE_SHARING_2nd_SCRI_Symposium_CIB16809.pdf
- Smith, J. A. (Ed.). (2015). *Qualitative Psychology: A Practical Guide to Research Methods*. London, Thousands Oaks, CA: Sage Publications.
- Soto, U. (2016, Diciembre). *Evaluación de la madurez de los principios Lean en proyectos de construcción* [Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio Pontificia Universidad Católica de Chile. https://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/11534/21502/Soto_Uriel.pdf
- Stasiak-Betlejewska, R. y Potkány, M. (2015). Construction Costs Analysis and its Importance to the Economy. *Procedia Economics and Finance*, 34, 35–42. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01598-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01598-1)
- Sun, M., Vidalakis, C., y Oza, T. (2009, January 1). A change management maturity model for construction projects. In R. Danty (Ed.). *Proceedings of the 25th Annual Association of Researchers in Construction Management AR-COM Conference 2009, October*, 803–812. University of the West of England,

- Bristol, Research Repository. <https://uwe-repository.worktribe.com/output/1005863/a-change-management-maturity-model-for-construction-projects>
- Tapia, R. S., Daneva, M., Van Eck, P. y Wieringa, R. (2008, September 16). Towards a business-IT aligned maturity model for collaborative networked organizations. *Proceedings 2008 12th Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops, EDOCW, June 16, Munich, Germany* (pp. 276–287). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDOCW.2008.59>
- Tenenhaus, M., Vinzi, V. E., Chatelin, Y. M. y Lauro, C. (2005, January 1). PLS path modeling. *Computational Statistics and Data Analysis*, 48(1), 159–205. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.03.005>
- Tezel, A. y Nielsen, Y. (2013, July). Lean construction conformance among construction contractors in Turkey. *Journal of Management in Engineering*, 29(3), 236–250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000145)
- The Chartered Institute of Building. (2002). *Code of Practice for Project Management for Construction and Development* (Third ed.). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. https://www.academia.edu/26538940/Code_of_Practice_for_Project_Management_for_Construction_and_Development
- Thomas, H. R., Horman, M. J., Minchin, R. E., y Chen, D. (2003, May 15). Improving Labor Flow Reliability for Better Productivity as Lean Construction Principle. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(3), 251–261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:3\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:3(251))
- Tortorella, G. L. y Fogliatto, F. S. (2013, dezembro). Assessment of Organizational Maturity for Lean Change. *Sistemas & Gestão*, 8(4), 444–451. <https://doi.org/10.7177/sg.2013.v8.n4.a10>, <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.945.1766&rep=rep1&type=pdf>
- Tortorella, G. L. y Fogliatto, F. S. (2014, febrero 6). Method for assessing human resources management practices and organizational learning factors in a company under Lean Manufacturing implementation. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4623–4645. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.881577>
- Vaishnavi, V. y Kuechler, W. (2007). *Design Science Research Methods and Patterns: Innovating Information and Communication Technology*. Boston, MA: Auerbach Publications.
- Valente, C. P., Novaes, M. de V., Mourão, C. A. M. de A. y Neto, J. de P. B. (2012). Lean monitoring and evaluation in a construction site: A proposal of lean audits [Paper presentation]. In I. D. Tommelein y C. L. Pasquire. *Proceedings of the 20th Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2012, July 18-20, San Diego, CA*. The International Group for Lean Construction. <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-e1f3a8af-5efb-4565-8f4f-0350ad284707.pdf>

- Van Aken, J. y Romme, G. (2012). A design science approach to evidence-based management. In D. M. Rousseau (Ed.). *The Oxford Handbook of Evidence-Based Management*, 140–184. <https://doi.org/10.1093/oxford-hb/9780199763986.013.0003>, <https://www.cebma.org/wp-content/uploads/van-Aken-Romme-A-Design-Science-Approach.pdf>
- Vera, D. y Crossan, M. (2004, June 1). Theatrical improvisation: Lessons for organizations. *Organization Studies*, 25(5), 727–749. <https://doi.org/10.1177/0170840604042412>
- Verjans, S. (2005). Bricolage as a way of life - Improvisation and irony in information systems. *European Journal of Information Systems*, 14(5), 504–506. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ejis.3000559>
- Vieira, H. F. (2006). *Logística Aplicada à Construção Civil* (1.ª edición). São Paulo: Editora Pini Ltda.
- Vieira, L. C., De Souza, L. O. y Amaral, M. T. (2012). Application of the rapid lean construction-quality rating model to engineering companies [Paper presentation]. In I. D. Tommelein y C. L. Pasquire (Eds.). *IGLC 2012 - Proceedings of the 20th Conference of the International Group for Lean Construction*, July 18-20, San Diego, CA. <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-b8061310-ad77-47fe-b7be-f3ed2043a1f6.pdf>
- Vilasini, N., Neitzert, T. R. y Rotimi, J. O. (2011). Correlation between Construction Procurement Methods and Lean Principles. *International Journal of Construction Management*, 11(4), 65–78. <https://doi.org/10.1080/15623599.2011.10773179>
- Wang, J., Xiao, J., Li, Q. y Li, K. (2011, November 26-27). Knowledge management maturity models: A systemic comparison. In *Proceedings - 2011 4th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2011, November 26-27, Shenzhen, China* (pp. 606–609). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2011.420>
- Wasserstein, R. L., y Lazar, N. A. (2016, June 9). The ASA's Statement on *p*-Values: Context, Process, and Purpose. *American Statistician*, 70(2), 129–133. <https://doi.org/10.1080/00031305.2016.1154108>
- Wendler, R. (2012, December). The maturity of maturity model research: A systematic mapping study. *Information and Software Technology*, 54(12), 1317–1339. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2012.07.007>
- Weston, R., y Gore, P. A. (2006, September 1). A Brief Guide to Structural Equation Modeling. *The Counseling Psychologist*, 34(5), 719–751. <https://doi.org/10.1177/0011000006286345>
- Whyte, W. F. (Ed.). (1991). *Participatory Action Research* Newbury Park, CA: Sage Publications, Inc.

- Wibowo, A. (2009). *The Contribution of the Construction Industry to the Economy of Indonesia: A Systemic Approach*. Civil Engineering Department, Diponegoro University, Indonesia. <https://core.ac.uk/reader/11702073>.
- Wiele, T., Brown, A., Millen, R. y Whelan, D. (2000). Improvement in Organizational Performance and Self-Assessment Practices by Selected American Firms. *Quality Management Journal*, 7(4). http://rube.asq.org/pub/qmj/past/vol7_issue4/qmj_v7i4_vanderwiele.html
- Windapo, A. (2013). *Fundamentals of Construction Management*. Bookboon.com. https://openlibrary.org/books/OL25646338M/Fundamentals_of_Construction_Management
- Womack, J. P. y Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press.
- Womack, J. P., Jones, D. T. y Roos, D. (1996). *La máquina que cambió al mundo*. Madrid: McGraw-Hill.
- Womack, J. P., Jones, D. T. y Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World*. New York: Free Press.
- Yi, W. y Chan, A. P. C. (2014, March). Critical review of labor productivity research in construction journals. *Journal of Management in Engineering*, 30(2), 214–225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000194)
- Zainudin A. (2012). The Second Order Confirmatory Factor Analysis. In *A Handbook on SEM (1st edition)*. (pp. 155–174). https://www.academia.edu/34981138/A_Handbook_on_SEM_Zainudin_Awang_Universiti_Sultan_Zainal_Abidin_THE_SECOND_ORDER_CONFIRMATORY_FACTOR_ANALYSIS, 2nd edition (pp. 163-181).

ANEXOS

MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES PARA EL ESTUDIO DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

MODELOS DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

Para realizar el estudio de fenómenos complejos, como algunos fenómenos sociales, psicológicos y, en particular, el fenómeno de la madurez que aborda esta investigación, se utilizan métodos multivariados. Corrientemente se usan técnicas de regresión múltiple, el análisis factorial, el análisis multivariante de la varianza y el análisis discriminante. Sin embargo, su limitación está en que solo pueden examinar una relación al tiempo, incluso el análisis multivariante de la varianza el cual solo representa una relación entre variables dependientes e independientes (Hair, Anderson, Tatham y Black, 1995; Cupani, 2012); esta limitación plantea la necesidad de utilizar técnicas de mayor nivel que las mencionadas como los SEM.

Los SEM han sido utilizados, sobre todo en el campo de las ciencias sociales, en la evaluación de variables no observables a partir de variables observables; además permiten identificar y analizar relaciones entre estas variables no observables. Son una familia de modelos estadísticos multivariantes que pueden ser utilizados para estimar el efecto y las relaciones entre múltiples variables; son una combinación de algunas técnicas multivariadas como la regresión múltiple, el análisis de caminos, o *path analysis*, y el análisis factorial (Kahn, 2006). Permiten estudiar simultáneamente relaciones de dependencia entre variables dependientes e independientes, siendo muy importantes las relaciones en las cuales una variable dependiente se convierte en independiente. Otro análisis que facilitan los SEM es la identi-

ficación de los efectos distintos de las mismas variables en cada una de las variables dependientes (Hair *et ál.*, 1995).

Los SEM dan más flexibilidad a los modelos de regresión. Combinan la regresión múltiple y el análisis factorial con cuya información resultante se pueden evaluar interrelaciones de dependencia, además de considerar los efectos del error de medida sobre los coeficientes estructurales al mismo tiempo (Cupani, 2012). Matemáticamente estos modelos son más complejos de estimar que otros modelos multivariantes como los de regresión o análisis factorial exploratorio; es algo así como resolver varios modelos de análisis factorial al mismo tiempo. Los SEM tienen la capacidad de estimar y evaluar la relación entre las variables latentes, así como la validez de cada una de ellas. Se puede utilizar una variedad de medidas para representar el constructo y controlar el error de medición específico de cada variable, a diferencia de otras técnicas de análisis en las cuales los constructos pueden ser representados con un único resultado y no se puede modelar el error relacionado con la medición.

En la construcción del SEM se propone el tipo y la dirección de las relaciones que se espera encontrar entre variables en el modelo. Así, luego de proponer el modelo, se estiman los parámetros de las relaciones propuestas a nivel teórico. Un SEM puede ser utilizado como modelo confirmatorio si a partir de la teoría se busca confirmar las relaciones usadas como base del modelo, o exploratorio si lo que se busca es identificar precisamente las relaciones entre las variables según la información contenida en ellas. Estos modelos no prueban la causalidad, solo ayudan a seleccionar hipótesis causales relevantes apoyadas en los datos, de tal manera que de las relaciones que se proponen, se seleccionan aquellas que representan los datos recolectados para el experimento (Weston y Gore, 2006) respectively, the authors offer a consumer's guide to SEM. Using an example derived from theory and research on vocational psychology, the authors outline six steps in SEM: model specification, identification, data preparation and screening, estimation, evaluation of fit, and modification. In addition, the authors summarize the debates surrounding some aspects of SEM (e.g., acceptable sample size, fit indices). El SEM está compuesto por dos "submodelos", el modelo de medida y el modelo estructural.

El modelo de medida establece la relación entre las variables latentes; para el SEM de la investigación realizada correspondieron a los factores de madurez (FM) y sus indicadores (atributos), el modelo de medida o modelo externo (Outer Model), y obedece las reglas del análisis de factores. En la Figura A4.1.1 se ejemplifica el modelo de medida del SEM haciendo uso de la estructura del modelo de la investigación. El objetivo del modelo de

medida es confirmar qué tan correlacionados están los atributos (que tan bien covarían) para identificar la variable latente (FM). En la medida en que estas variables cuenten con altos valores de correlación, indica que el investigador ha acertado en las relaciones entre las variables (Weston y Gore, 2006) respectively, the authors offer a consumer's guide to SEM. Using an example derived from theory and research on vocational psychology, the authors outline six steps in SEM: model specification, identification, data preparation and screening, estimation, evaluation of fit, and modification. In addition, the authors summarize the debates surrounding some aspects of SEM (e.g., acceptable sample size, fit indices. El modelo que relaciona los FM es el modelo estructural o modelo interno (Inner Model). En este modelo se describen las relaciones entre ellas; "es una extensión de varias técnicas multivariantes como la regresión múltiple, el análisis factorial y el análisis de senderos". La Figura A4.1.2 muestra el modelo interno tomando como ejemplo el modelo para el SEM de la investigación realizada. Uno de los supuestos fundamentales del SEM es que las variables dependientes tienen cierta variación no explicada por la variable latente que es atribuible al error de medición (Cupani, 2012) y la varianza del error debe ser modelada.

Supuestos del modelo: son los supuestos más relevantes.

- a. Relación de colinealidad entre variables,
- b. las variables independientes afectan a la variable dependiente en forma aditiva, sus efectos se suman,
- c. los modelos son recursivos, no se presentan relaciones de reciprocidad entre variables. La relación causa-efecto fluye en una dirección.
- d. Los errores no se correlacionan con las variables independientes ni se correlacionan entre sí,
- e. Las variables observadas han sido medidas directamente sin error.

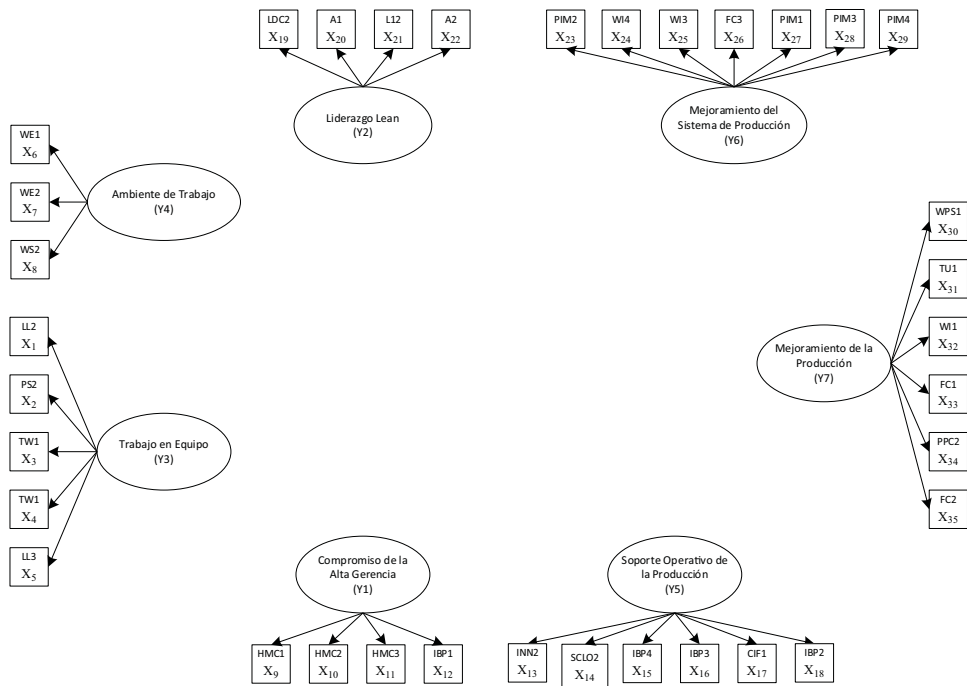


Figura A4.1.1 Modelo de medida u Outer Model

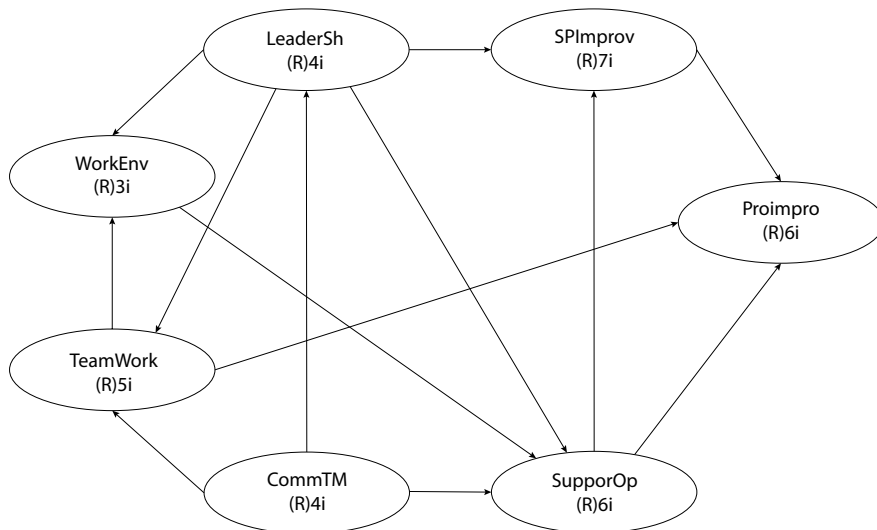


Figura A4.1.2. Modelo estructural o Inner Model

Contexto teórico relacionado con modelos de ecuaciones estructurales

A continuación se presentan algunas definiciones importantes relacionadas con el SEM.

- **Variables observables o manifiestas:** Se miden directamente de un experimento diseñado para obtener su información, se representan por cuadrados y se asignan letras X. Figura A4.1.3.

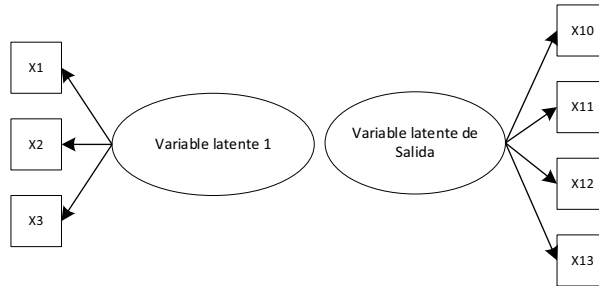


Figura A4.1.3. Variables observadas agrupadas en variables latentes, relaciones reflexivas

- **Variables no observables o latentes:** No pueden ser medidas directamente, se miden por medio de las variables observadas. Representan conceptos unidimensionales, constructos, que están alineadas con la teoría del tema de interés. Se representan por círculos o elipses y se usan letras griegas ξ para su condición como endógena y η para su condición como exógena.

Una variable puede tener las dos funciones, exógena y endógena, esto configura un efecto mediador.

- **Variable exógena:** También denominada independiente. No recibe impacto de otra variable, de ella solo salen flechas. Se encuentra en el límite del modelo. Se refiere a las variables observadas. Transmiten su variabilidad al interior del modelo; sin embargo, no se especifica la fuente de variación que da lugar a ellas. Estas variables son causa para variables endógenas.
- **Variable endógena:** Es una variable dependiente o también denominada explicada. Reciben el efecto de otras variables, a ella llegan flechas. Este tipo de variables se caracteriza por explicar su variabilidad en términos de otras variables que pueden ser exógenas o endógenas. Estas variables son efecto de otras; sin embargo, pueden ser causa de otras variables dependientes.

Relaciones entre variables

Las flechas de una dirección representan el efecto directo de una variable sobre otra, la hipótesis. El origen de la flecha es la causa y la punta de la

flecha el efecto. Una relación recíproca entre variables se representa por dos flechas en sentido contrario. Y la correlación entre variables por una flecha curva bidireccional.

Las relaciones entre las variables observadas y las variables latentes se establecen con flechas que salen de la variable latente hacia las variables observadas indicando que las variables observadas están correlacionadas; esta es una relación reflexiva e indica que la variable latente es causada o explicada por las variables observadas. Si la flecha va de la variable observada a la variable latente, indica que las variables son independientes y no hay ninguna correlación entre ellas. Es una relación formativa, las variables observadas explican a la variable latente.

No se puede hablar de que haya correlación entre variables latentes, lo que hay entre ellas es una relación causa efecto. Algunas variables latentes se explican a partir de otras latentes y pueden ser dependientes o independientes según la posición de estas en el modelo.

- **Errores:** Se representan como variables y se denotan con la letra griega δ o ζ , y se dibuja una flecha en dirección de la variable con la cual se relacionan. Los errores corresponden a las causas de una variable que no fueron consideradas.
- **Método de estimación del modelo:** La estimación de un modelo de ecuaciones estructurales se puede realizar por dos métodos: análisis de covarianzas (el cual integra el análisis de senderos, análisis de componentes principales y análisis de factores) o análisis de varianzas (o análisis de componentes).
- **Análisis de varianzas:** Llamado también análisis de componentes, desarrollado por Herman Wold bajo el nombre de mínimos cuadrados parciales o PLS (Partial Least Squares) (Tenenhaus, Vinzi, Chatelin y Lauro, 2005), es una generalización del análisis de componentes principales. Es un método de modelado lineal para evaluar la relación entre campos; se prueba si el valor objetivo de media varía entre combinaciones de categorías de dos entradas. Si la variación es significativa, existe un efecto de interacción.
- **Análisis de covarianzas:** Desarrollado por Jöreskog (1993), es una generalización del modelo de senderos, análisis de componentes principales y análisis de factores. La covarianza es un valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias respecto a sus medias.
- **Relación reflexiva:** Se indica con la flecha que sale desde la variable latente hacia la variable observada. Indica que hay correlación entre las variables observadas. Figura 4.3.

- **Relación formativa:** Esta relación se indica con la flecha que va desde la variable observada a la variable latente. Indica que no hay correlación entre las variables observadas, ellas son independientes entre sí.

Tipos de relaciones entre las variables del modelo

Estas relaciones pueden ser de cinco tipos: covarianza, efectos directos, efectos indirectos, efecto de conjunto y efecto espúreo. En la investigación realizada se consideraron solamente aquellos que no contemplan reciprocidad entre las variables.

- **Covarianza:** Análoga a la correlación. Es una relación no direccional entre las variables latentes independientes. Se representa por una flecha con doble punta. En la investigación realizada no se propuso este tipo de relaciones. Figura A4.1.4.



Figura A4.1.4. Esquema de covarianza

- **Efecto directo:** Es la relación entre la variable latente y la variable observada o entre dos variables latentes; esta relación es similar al análisis de regresión múltiple. Se representa por una flecha unidireccional. Esta flecha solo indica dirección, no causalidad. Figura A4.1.5.

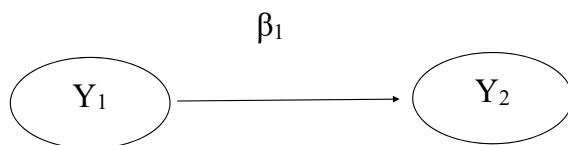


Figura A4.1.5. Esquema del efecto directo

- **Efecto indirecto:** Este efecto puede ser de dos tipos, mediador o moderador. Se presentan entre variables latentes. Figura A4.1.6.

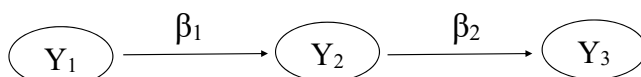


Figura A4.1.6. Esquema del efecto indirecto

El efecto mediador corresponde al efecto de una variable latente independiente en una variable latente dependiente mediado por una o más variables latentes (Baron y Kenny, 1986). Figura A4.1.7

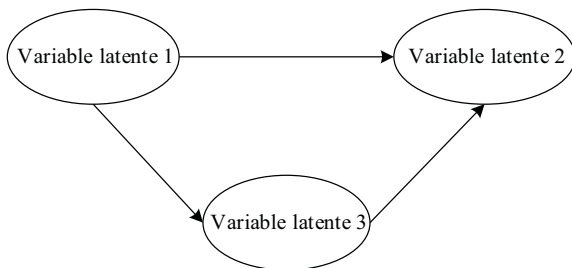


Figura A4.1.7. Esquema del efecto mediador

El efecto moderador se da en la relación que hay entre dos variables latentes impactada por una variable latente (moderadora). En este efecto, la variable moderadora afecta la dirección y/o la fuerza de la relación entre una variable independiente o predictor y una variable dependiente o criterio (Baron y Kenny, 1986). Figura A4.1.8.

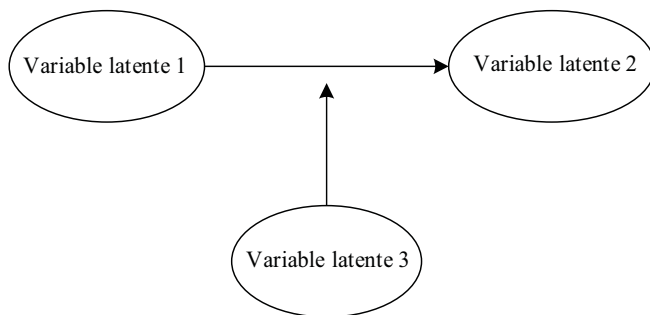


Figura A4.1.8. Esquema del efecto moderador

- **Efecto de conjunto:** Se refiere a las variables exógenas que presentan covariación, en las que no puede establecerse claramente en qué dirección se presenta la influencia. Este efecto no se consideró en la investigación realizada.
- **Efecto espúreo:** Este efecto se produce en dos o más variables latentes endógenas a causa de una variable latente exógena. La covariación es debida a una causa común. Figura A4.1.9.

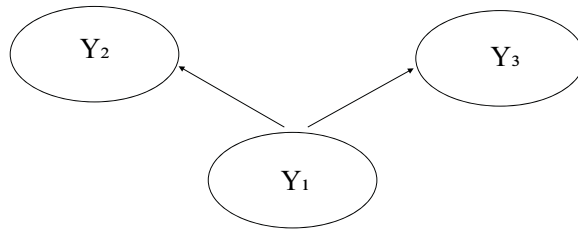


Figura A4.1.9. Esquema del efecto espúreo

El proceso de construcción del modelo

El modelo de ecuaciones estructurales (SEM) permite resolver dos problemas: el primero, la necesidad de revelar las relaciones entre todos los elementos categorizados, identificar las interacciones o las razones de causalidad entre ellos. Y, el segundo, entender la función de cada uno de los elementos en el proceso de madurez con el fin de conducir el desarrollo del modelo de evolución que fue el interés de la investigación realizada.

Existen tres estrategias para el desarrollo del SEM:

- **Modelización confirmatoria:** Se especifica el modelo aislado y se utiliza el SEM para evaluar, por medio de los resultados estadísticos, su desempeño o ajuste. Este modelo probablemente es uno de muchos posibles modelos que pueden ser propuestos y no necesariamente es el “mejor”, lo que se denomina un sesgo confirmatorio.
- **Modelos rivales:** Permite evaluar el modelo propuesto con respecto de diferentes modelos alternativos e identificar el modelo que permita el mejor nivel de ajuste y por tanto seleccionar el “mejor” modelo.
- **Desarrollo del modelo:** Con un modelo propuesto, se busca mejorarlo sistemáticamente al modificar el modelo de medida y/o el estructural. Aquí se proponen modelos diferentes para encontrar uno nuevo.

Esta investigación utiliza la estrategia del desarrollo del modelo. El modelo propuesto fue especificado con un arreglo de variables observadas que se agrupan y explican alrededor de variables latentes. Con ayuda del análisis factorial se confirma que la ubicación de las variables observadas en cada una de las latentes fuera consistente con su aporte de variabilidad a cada una de ellas. Se propusieron las relaciones a probar entre ellas; estas relaciones se fueron revisando en diferentes configuraciones de relaciones hasta encontrar la que, a juicio de la investigadora, representaba el mejor ajuste y la mejor configuración de relaciones para el estudio.

Recolección de información

Un instrumento de medida debe sustentar relevancia, congruencia, suficiencia y claridad. La información recolectada debe ser objeto de una validación racional y una validación estadística. Demostrar que con la revisión de bibliografía se surte la validación racional y contrastar con juicio de expertos.

INSTRUMENTO PARA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Se desarrolla la encuesta con cuarenta y ocho atributos y se solicita la participación de 256 expertos LC: investigadores, practicantes y profesores; de los cuales respondieron 111 expertos alrededor del mundo. Para la identificación de estos expertos, se hizo uso de las referencias utilizadas en la investigación en el proceso de revisión de bibliografía. Con base en esas referencias se fueron incluyendo otros expertos que aparecen como coautores en las investigaciones referenciadas. También se hizo uso de la red de profesionales “LinkedIn” para encontrar contactos de otros expertos en LC como parte del círculo profesional de expertos en esa red.

Los cuarenta y ocho atributos se agruparon inicialmente en dieciséis FM, Tabla A4.1.1, que más adelante se agrupan en siete FM.

Tabla A4.1.1. Factores evaluados en la encuesta

Factores de la primera parte de la encuesta		Factores de la primera parte de la encuesta	
1	Actitud y cultura	9	Seguridad en el sitio de trabajo
2	Aprendizaje y desarrollo de competencias en todos los niveles	10	Utilización de herramientas Lean Construction
3	Trabajo en equipo	11	Innovación
4	Liderazgo Lean	12	Compromiso de la alta dirección
5	Solución de problemas	13	Procesos internos de negocio
6	Cumplimiento de los principios Lean Construction	14	Comunicación y flujo de información
7	Sistema de planeación y control de la producción	15	Cadena de suministro y operaciones logísticas
8	Estandarización de los procesos de trabajo	16	Ambiente de trabajo

Es muy importante entender, al comparar los siete FM obtenidas del PCA para el SEM, que en ellas se integran los conceptos que se pretendían agrupar en estos dieciséis FM. Esto es una ganancia para el modelo, pues se desarrolla con un número menor de variables, lo que contribuye a la elaboración de un modelo más compacto y robusto.

Como se explicó, se preguntó en la encuesta por la importancia de los FM y los atributos para la madurez LC en la GPC. La escala utilizada fue Likert (1932):

- El atributo no es importante en la madurez de LC en la GPC.
- El atributo es ligeramente importante en la madurez de LC en la GPC.
- El atributo es importante en la madurez de LC en la GPC.
- El atributo es muy importante en la madurez de LC en la GPC.
- El atributo es extremadamente en la madurez de LC en la GPC.

VALIDACIÓN RACIONAL

Con la aplicación del índice de Aiken a los cincuenta y cinco atributos identificados inicialmente (Aiken, 1980, 1985) se confirman cuarenta y ocho atributos para la encuesta a expertos. De acuerdo con la recomendación del método, se requiere un mínimo de ocho expertos en el uso de este método. Se contó con los ocho expertos: cuatro de ellos en Colombia y cuatro en Santiago de Chile. A ellos se les preguntó personalmente si cada atributo era importante para ser considerado en el estudio con una escala de 1 a 10. Por parte de los expertos, no fue sugerido ningún atributo adicional. Con este índice se eliminaron del listado de atributos siete de ellos y se construyó el formulario para la encuesta.

Se considera que si en la aplicación de la encuesta alguno de los atributos fuese calificado en el nivel 1 por el 51% de los expertos, este atributo se elimina del estudio. Luego de aplicar la encuesta a los expertos, no se presentó que alguno de ellos fuese calificado de manera que ameritara su eliminación del estudio; sin embargo, más adelante, al usar el SEM, se reducen el número de atributos de cuarenta y ocho atributos a treinta y cinco.

Los treinta y cinco atributos conforman el modelo de medida. Los trece atributos no considerados no se tuvieron en cuenta para la construcción del SEM. Por medio de la validación estadística se confirmó que estos atributos responden a aspectos similares. Sin embargo, no se eliminaron del estudio; serán utilizados en una investigación futura para el desarrollo de la herramienta de evaluación del estado actual de madurez de proceso de PPC. Los atributos no considerados se presentan en la Tabla A4.1.2. En la columna de la derecha de esta tabla se presenta el atributo con el cual está asociado el atributo retirado.

Validación estadística de la información recolectada

En este punto se verificó la validez estadística de la información obtenida para las cuarenta y ocho variables con el cálculo del índice Alfa de Cronbach (Cronbach, 1951). El Alfa de Cronbach permite medir la fiabilidad de la escala de medida para la magnitud inobservable, que es la madurez, construida a partir de las cuarenta y ocho variables observadas. “En particular, las n variables deberían realizar mediciones estables y consistentes con un elevado nivel de correlación entre ellas” (Cronbach, 1951).

En la medida en que el valor obtenido se aproxime a 1.0 mayor es la fiabilidad de la escala. En este caso, para las cuarenta y ocho variables, se obtuvo un valor para el Alfa de Cronbach de 0.960, índice calculado con ayuda del *software* SPSS18. El criterio de aceptación considera que valores del Alfa de Cronbach superiores a 0,7 son suficientes para garantizar la fiabilidad de la escala. Con este valor se confirmó la fiabilidad de la escala y se verificó que la selección de expertos había sido apropiada (Cronbach, 1951). El análisis de los estadísticos relacionados con el modelo se presenta en la sección correspondiente a la evaluación del ajuste del modelo.

Tabla A4.1.2. Los trece atributos retirados para la construcción del SEM relacionados con el atributo que se conserva para la construcción del modelo

Atributos incluidos en el SEM		Trece atributos retirados para la construcción del SEM	
6	Formación en la filosofía LC	4	Forma de pensar
7	Desarrollo de los equipos de trabajo	5	Competencias de las personas
13	Solución de problemas y aprendizaje conjunto	12	Entendimiento del problema
15	Mejoramiento continuo	27	Implementación de un sistema de gestión y control de calidad
16	Flujo continuo	20	Reducción del desperdicio
26	Desarrollo de un sistema Pull	25	Desarrollo y operación de un sistema de planeación y control de la producción
28	Desarrollo de estándares	29	Mejoramiento y sostenibilidad de estándares
31	Aprendizaje y entrenamiento para la seguridad en el sitio de trabajo	30	Preocupación por la seguridad en el sitio de trabajo
32	Conocimiento y selección de herramientas Lean Construction	33	Nivel de utilización de herramientas Lean Construction
34	Gestión del conocimiento	35	Integración de nuevos desarrollos
43	Sistemas de información	44	Flujo de información
46	Operaciones logísticas	45	Gestión de la cadena de suministro
47	Participación de las personas en la construcción del ambiente de trabajo	48	Construcción del ambiente de trabajo - Interacción en el entorno de trabajo (calidad de vida en el ambiente de trabajo)

VALORES PERDIDOS Y VALORES FUERA DEL RANGO

La matriz de datos obtenidos para este estudio no presentó datos perdidos o *Missing Data* ni valores fuera del rango de calificación. Esto se debe a que la encuesta, al realizarse por medio de un formato electrónico, permitió seleccionar en su diseño una instrucción que no permitía el envío del formulario hasta que no se respondieran todas las preguntas.

De igual manera, no hay presencia de valores fuera del rango de evaluación, entre 1 y 5, ya que la calificación se selecciona de un set de opciones y la herramienta no permitía una calificación distinta.

Construcción del modelo de ecuaciones estructurales

De acuerdo con Cupani (2012), expertos en SEM consideran seis pasos que se deben seguir para aplicar esta técnica:

- especificación del modelo,
- estimación de parámetros,
- identificación del modelo,
- evaluación del ajuste,
- re-especificación del modelo,
- interpretación de resultados (Kaplan, 2000; Kline, 2011).

ESPECIFICACIÓN DEL MODELO

Se propuso un primer SEM empírico, mostrado en las Figuras A4.1.10 y A4.1.11. En este modelo se propusieron todas las relaciones posibles con base en la experiencia de la investigadora y de su interacción con los expertos. Este modelo, de acuerdo con el método de SEM, debe ser recursivo, lo que implica que las influencias causales tienen que ser unidireccionales y sin que se presenten efectos retroactivos o bucles entre los FM; este no es un modelo causal según la teoría de dinámica de sistemas, se basa en regresiones.

Este modelo se compone de los FM y los atributos asociados a ellos como se explicó en la sección anterior. Con la agrupación de los atributos en cada uno de los FM, y las relaciones propuestas entre FM, se identificó el FM con mayor cantidad de interacciones (las de los atributos y las relaciones entre este y otros FM). Esto dio como resultado que los FM mejoramiento del sistema de producción (SPImprov) y mejoramiento de la producción (ProImprcontaron cada uno con 12 relaciones. SPImprov con siete relaciones que corresponden a los atributos que lo explican y cinco relaciones causales referidas a los FM: Liderazgo Lean, soporte operativo,

compromiso de la alta dirección, trabajo en equipo y ambiente de trabajo que impactan a este FM. Para ProImpr seis relaciones que corresponden a los atributos que lo explican y seis relaciones causales referidas a los FM: Liderazgo Lean, soporte operativo, compromiso de la alta dirección, trabajo en equipo, ambiente de trabajo y mejoramiento del sistema de producción que impactan a este FM. Estas relaciones propuestas pueden apreciarse en la Figura A4.1.12.

De acuerdo con Kline (2011), para calcular el tamaño de muestra para el análisis factorial en este modelo se requiere obtener 120 encuestas como mínimo para contar con una fuente de información confiable. Este autor explica que una muestra adecuada debería tener entre 10 y 20 participantes por parámetro observado. En la investigación realizada se consideró un mínimo de 10 participantes por parámetro, así que, con 12 parámetros de la variable con más relaciones se requieren 120 respuestas.

Se recibieron 111 respuestas, un 7.5% por debajo de las requeridas según Kline (2011). Se optó por avanzar en la consolidación de la estructura del modelo con estas 111 respuestas. Este paso guarda particular importancia, pues, a pesar de que no se contó con el número mínimo recomendado de encuestas, con ayuda del *software* para aplicar el SEM, se descartaron relaciones no significativas. De esta manera, se verificó que con las relaciones significativas se requieren 90 respuestas. El FM con más parámetros a estimar fue el mejoramiento del sistema de producción con nueve relaciones, los siete atributos y dos relaciones causales de los FM: Liderazgo Lean y soporte operativo. De esta manera, las 111 respuestas correspondieron a un 23% por encima del requerido.

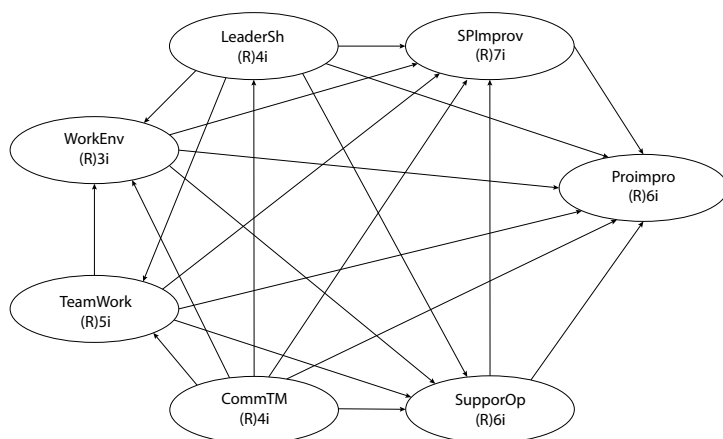


Figura A4.1.10. Relaciones propuestas de los factores de madurez. Modelo empírico. Relaciones para comprobar. Inner Model del SLC-MM

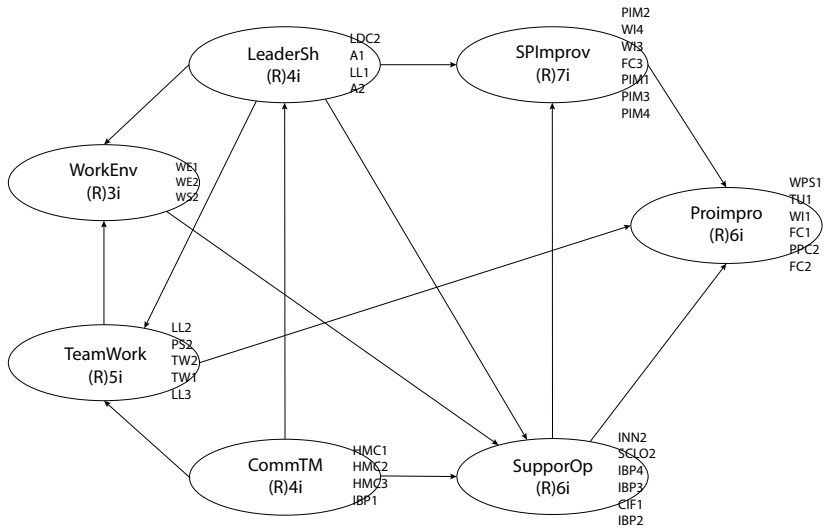


Figura A4.1.11. Atributos asociados a los factores de madurez según su clasificación en las categorías

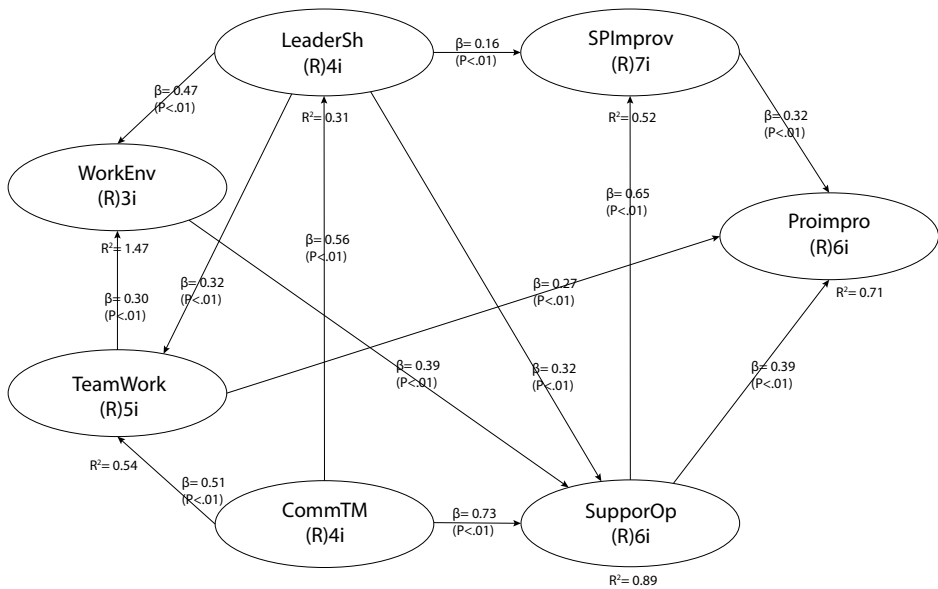


Figura A4.1.12. Modelo de ecuaciones estructurales para la madurez de LC en la GP

SELECCIÓN DE VARIABLES OBSERVADAS PARA CONFORMAR LAS VARIABLES LATENTES

Con las respuestas de las encuestas y el modelo preliminar, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con los cuarenta y ocho atributos para buscar una forma más eficiente de agrupamiento. La técnica de PCA ayuda a reducir la cantidad de atributos al agruparlas en FM. La forma de agrupar los atributos según el PCA no promovía conceptos LC que estuvieran documentados, o a los que hubieran hecho referencia los expertos. Esto implicó tomar la decisión de realizar PCA para los atributos agrupados en cada una de las tres categorías de madurez. Esta decisión está fundamentada en el trabajo previamente realizado de agrupación según las categorías propuestas en Cano *et ál.* (2015).

Al aplicar PCA a los atributos en las categorías, los FM resultantes representaron conceptos conocidos y documentados en LC. Los atributos altamente correlacionados explican el FM que las agrupa; es su contenido de variabilidad el que aporta a esta definición. Los atributos de manera individual explican fenómenos particulares de madurez, los cuales reunidos en el FM explican fenómenos de mayor nivel. En este sentido, cuando un atributo contiene la misma información que otro, uno de ellos es eliminado del conjunto.

Un modelo construido de esta manera busca ser más simple y contener la información precisa que se requiere. El objetivo de la utilización de PCA fue la construcción del modelo para la investigación realizada con un número preciso de FM, los cuales, hasta antes de la aplicación de PCA, correspondían a dieciséis variables latentes propuestas. De esta manera se obtuvieron siete FM con treinta y cinco atributos.

Una condición que se exige para el uso de PCA se refiere a que las variables tienen que distribuirse normalmente, por lo cual los datos se transformaron utilizando el método del logaritmo para cada una de las columnas de datos de las variables observadas. Los datos también fueron estandarizados y no hubo necesidad de realizar tratamiento de datos para eliminar valores fuera de rango ni reemplazos por valores faltantes, pues como se explicó, no se presentaron ninguna de las dos situaciones.

Aquí es importante explicar que se puede construir el SEM sin realizar previamente un PCA. Este paso es particular para la investigación realizada. El uso del PCA permitió un ahorro significativo de tiempo, ya que, al agrupar las variables observadas según el criterio de contenido de variabilidad, fue más precisa la conformación de los constructos. La agrupación de variables se puede realizar haciendo uso del *software* WarpPLS, el cual

realiza un análisis factorial (FA). Este FA se concentra en el modelo de medida y con esta información se puede ir ajustando la selección de variables observadas asignadas a las variables latentes con ayuda de sus cargas factoriales, Tabla A4.1.3. Los conceptos bajo los cuales se agrupan las variables observadas representan de manera muy precisa los conceptos estudiados en la teoría, conceptos con los que se configuraron los siguientes FM:

- compromiso de la alta dirección,
- soporte operativo a la producción,
- ambiente de trabajo,
- Liderazgo Lean,
- trabajo en equipo,
- mejoramiento del sistema de producción y
- mejoramiento de la producción.

En la conformación de los FM, el criterio de agrupación de los atributos se corresponde con que los valores propios (Eigenvalues) estuvieran por encima de 1.0; esto indica el número de variables latentes que pueden ser obtenidas a partir de las variables observadas. Se consideraron como importantes aquellos factores con un valor mayor o igual a la unidad en sus valores propios. Para la conformación de cada FM se consideró el aporte del grupo de atributos con una variabilidad total mayor a 0.5. Este criterio corresponde con el aporte de variabilidad $R^2=0.5$, o sea un R de 0.7 que ya considera un alto contenido de variabilidad entonces el criterio de inclusión de las variables observadas es mayor o igual al 0.7 de varianza (García, 2011) encaminada a incrementar la disponibilidad de la maquinaria y equipo de producción y los beneficios económicos de las empresas. Sin embargo, no se conocen los factores administrativos que aseguren su éxito de implantación. En este artículo se presentan los resultados de una encuesta que constó de 20 ítems y fue aplicada a 203 gerentes y supervisores de mantenimiento de empresas localizadas en Ciudad Juárez, la cual debía ser respondida en una escala Likert. El cuestionario se validó mediante el índice Alfa de Cronbach, se aplicó un análisis factorial exploratorio (AFE. En la Figura A4.1.12 se muestra la configuración del modelo con la identificación de los atributos en cada FM.

CREACIÓN DEL MODELO EN ECUACIONES ESTRUCTURALES

Una vez identificados los FM, se precisó la estructura del SEM, se corrió el programa y se confirmó la correlación entre los atributos de cada FM con

ayuda del FA. El criterio de agrupamiento confirma que estos atributos se integran al FM con valores de varianza por encima de 0.6 (por debajo de 0.5 indica que no se asocia con el FM). Las cargas factoriales reflectoras de los FM fueron altas, corresponden a una matriz de estructura (es decir, no girada), y las cargas cruzadas son bajas, estas corresponden a una matriz de patrón (es decir, girada).

En el modelo, un atributo mostró una CF más alta en un FM diferente al que estaba ubicado, el IBP1. Este se haya con carga factorial 0.616 en el FM compromiso de la alta dirección (CommTM). El FA muestra que estaría mejor ubicada en el atributo mejoramiento del sistema de producción con CF de 0.659. Se probó cambiarla de lugar y el modelo desmejoró su ajuste. Por lo que se regresó al FM original.

Tabla A4.1.3. Cargas factoriales normales de las variables observadas que explican los factores de madurez. Cargas combinadas y cargas cruzadas

	X_i	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SPIIm-prov	Pro Impr	SE	Valor P
LL2	X_1	0.715	0.401	0.511	0.362	0.560	0.260	0.525	0.127	<0.001
PS2	X_2	0.768	0.511	0.414	0.344	0.394	0.328	0.465	0.144	<0.001
TW2	X_3	0.792	0.445	0.374	0.312	0.431	0.205	0.384	0.106	<0.001
TW1	X_4	0.737	0.428	0.301	0.280	0.393	0.126	0.341	0.133	<0.001
LL3	X_5	0.710	0.320	0.433	0.418	0.356	0.365	0.549	0.126	<0.001
WE1	X_6	0.453	0.738	0.459	0.480	0.520	0.338	0.448	0.111	<0.001
WE2	X_7	0.403	0.729	0.346	0.361	0.414	0.227	0.394	0.082	<0.001
WS2	X_8	0.385	0.725	0.299	0.403	0.392	0.211	0.454	0.085	<0.001
HMC1	X_9	0.507	0.397	0.828	0.571	0.477	0.369	0.619	0.102	<0.001
HMC2	X_{10}	0.502	0.448	0.832	0.612	0.417	0.472	0.674	0.091	<0.001
HMC3	X_{11}	0.456	0.429	0.718	0.390	0.607	0.287	0.499	0.092	<0.001
IBP1	X_{12}	0.168	0.235	0.616	0.652	0.130	0.659	0.479	0.083	<0.001
INN2	X_{13}	0.310	0.329	0.607	0.725	0.264	0.596	0.558	0.076	<0.001
SCLO2	X_{14}	0.418	0.445	0.562	0.813	0.260	0.579	0.659	0.075	<0.001
IBP4	X_{15}	0.474	0.576	0.520	0.773	0.339	0.420	0.535	0.096	<0.001
IBP3	X_{16}	0.150	0.270	0.478	0.727	0.067	0.674	0.507	0.082	<0.001
CIF1	X_{17}	0.309	0.429	0.555	0.833	0.220	0.609	0.607	0.077	<0.001
IBP2	X_{18}	0.426	0.520	0.640	0.652	0.343	0.299	0.519	0.101	<0.001
LDC2	X_{19}	0.509	0.425	0.386	0.181	0.773	0.234	0.429	0.100	<0.001
A1	X_{20}	0.405	0.400	0.461	0.208	0.767	0.297	0.506	0.111	<0.001
LL1	X_{21}	0.479	0.500	0.531	0.365	0.729	0.341	0.490	0.099	<0.001
A2	X_{22}	0.262	0.421	0.195	0.200	0.617	0.226	0.163	0.096	<0.001

	X_i	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SPIIm-prov	Pro Impr	SE	Valor P
PIM2	X_{23}	0.215	0.188	0.483	0.552	0.311	0.826	0.560	0.089	<0.001
WI4	X_{24}	0.259	0.240	0.425	0.514	0.234	0.804	0.565	0.081	<0.001
WI3	X_{25}	0.263	0.313	0.458	0.529	0.291	0.802	0.630	0.073	<0.001
FC3	X_{26}	0.280	0.251	0.491	0.587	0.226	0.780	0.561	0.084	<0.001
PIM1	X_{27}	0.173	0.280	0.445	0.512	0.277	0.756	0.529	0.082	<0.001
PIM3	X_{28}	0.359	0.352	0.498	0.463	0.468	0.704	0.526	0.120	<0.001
PIM4	X_{29}	0.271	0.245	0.348	0.547	0.197	0.601	0.472	0.091	<0.001
WPS1	X_{30}	0.359	0.306	0.599	0.632	0.261	0.587	0.767	0.085	<0.001
TU1	X_{31}	0.356	0.402	0.646	0.630	0.439	0.629	0.740	0.088	<0.001
WI1	X_{32}	0.385	0.377	0.537	0.537	0.478	0.755	0.739	0.100	<0.001
FC1	X_{33}	0.421	0.477	0.547	0.545	0.347	0.383	0.733	0.072	<0.001
PPC2	X_{34}	0.481	0.528	0.467	0.460	0.437	0.406	0.701	0.115	<0.001
FC2	X_{35}	0.654	0.490	0.515	0.463	0.438	0.423	0.685	0.127	<0.001

Aquí, el criterio de la investigadora juega un papel muy importante pues esas variables muestran más adherencia a las decisiones que toma la alta dirección y al mejoramiento del sistema de producción respectivamente.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Los parámetros corresponden a las cargas factoriales de los atributos a cada una de los FM con los que están relacionadas, Los valores de los β entre los FM y los errores asociados a los atributos y a los FM. El número de parámetros a estimar es la sumatoria de los siguientes:

Parámetros para variables observadas, son treinta y cinco.

Parámetros para las variables latentes, son siete.

Los valores de β entre variables latentes, son trece.

Errores para las variables observadas, son treinta y cinco.

Errores para las variables latentes, son siete.

Numero de parámetros a estimar, $NPE = 35 + 7 + 13 + 35 + 7 = 97$.

IDENTIFICACIÓN DEL MODELO

Si el modelo teórico está relacionado conforme con el fenómeno que se desea estudiar a juicio del investigador, se procede a su identificación con el

fin de asegurar que se pueden estimar los parámetros del modelo. Un modelo está identificado si todos los parámetros lo están; esto significa si hay una solución para cada uno de los parámetros.

Un modelo es *identificado* si cuenta con cero grados de libertad, lo que corresponde a un ajuste perfecto del modelo. Esta solución no tiene interés puesto que no se pueden generalizar los resultados del estudio.

Un modelo es *sobre-identificado* si consta de más información en la matriz de datos que el número de parámetros a estimar, corresponde a un valor positivo de grados de libertad. Este es el ideal de todos los SEM, disponer de más información que parámetros haya que resolver, obtener el mayor número de grados de libertad posible. Al igual que otras técnicas multivariantes, el investigador se esfuerza por conseguir un ajuste aceptable con el mayor grado de libertad posible. Esto garantiza que el modelo sea fácilmente generalizado.

Un modelo *sub-estimado* tiene grados de libertad en negativo. Se busca estimar más parámetros de los que se pueden con la información disponible. Para la identificación del modelo de esta investigación, se calculan los grados de libertad del modelo con la siguiente fórmula:

NVO: Número de variables observadas, son treinta y cinco.

NPE: Número de parámetros a estimar, son noventa y siete

$GL = (NVO \times (NVO + 1)) / 2 - NPE = GL = (35 \times (35 + 1)) / 2 - 97 = 533.$

Resultado de la identificación del modelo

El modelo cuenta con 533 grados de libertad. Este resultado muestra un modelo sobre-identificado, lo que significa es que existe más información que parámetros a estimar y, en consecuencia, el modelo puede ser estimado y contrastado.

Consideraciones del resultado de la identificación del modelo

Un modelo con más grados de libertad es más parsimonioso. El modelo se ajusta bien a los datos y se demuestra que las asociaciones entre los atributos y los FM son más importantes.

Validez de la información para los factores de madurez

Es importante verificar la validez de las variables del modelo para posteriormente interpretarlo. No es conveniente interpretar el modelo hasta que no se verifique su validez. Primero se debe asegurar que las variables son válidas y así asegurar que el modelo es válido. El análisis de la información de los atributos se lleva a cabo con base en la Tabla A4.1.4 (es la misma Tabla 4.4 del documento principal). Estos índices se validan de acuerdo con la inter-

pretación detallada en el Anexo 4.3 para la validez de los FM del SEM. Los elementos de referencia se presentan a continuación.

R-Squared	$\geq 20\%$
Cronbach's Alpha	≥ 0.7 , el criterio relajado es para Composite realibility ≥ 0.8
AVE	≥ 0.5
VIF	≤ 3.3
Q-squared	> 0.0
Skewness	≤ 3.0
Kurtosis	≤ 5.0 , un criterio más relajado es ≤ 10

Todos los indicadores presentados demuestran la validez de la información de los FM.

Tabla A4.1.4. Estadísticos del SEM. Software WarpPLS 6.0. Coeficientes de los factores de madurez.

Estadístico	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SPImprov	ProImpr
R-Squared	0.539	0.469		0.890	0.311	0.522	0.706
Adj. R-Squared	0.530	0.459		0.887	0.305	0.513	0.698
Composite realib.	0.862	0.774	0.838	0.888	0.814	0.903	0.871
Cronbach's Alpha	0.799	0.563	0.738	0.848	0.693	0.873	0.822
Avg. Var. Extract.	0.555	0.534	0.568	0.572	0.525	0.573	0.530
Full collin. VIF	1.975	2.402	3.305	4.103	2.358	2.737	4.298
Q-squared	0.542	0.476		0.654	0.316	0.518	0.707
Min	-5.380	-3.334	-3.652	-3.680	-3.885	-3.544	-3.902
Max	1.271	1.529	1.400	1.760	1.492	1.532	1.449
Median	0.208	0.265	0.069	0.227	0.299	0.170	0.169
Mode	1.271	0.365	1.070	0.021	0.770	-0.193	-0.328
Skewness	-2.154	-1.075	-0.940	-1.044	-1.487	-0.991	-1.353
Exc. Kurtosis	8.051	1.842	0.915	1.738	2.438	0.846	2.258
Unimodal – RS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Unimodal – KMW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Normal – JB	No	No	No	No	No	No	No
Normal – RJB	No	No	No	No	No	No	No

Evaluación del ajuste del modelo. Prueba de robustez

Una vez se ha validado la información de los FM de manera individual, se valida el modelo general. Para interpretar los resultados del SEM se analizan cuidadosamente varias pruebas estadísticas y un conjunto de índices para determinar que la estructura teórica propuesta suministra un buen ajuste a los datos empíricos. Este ajuste se verifica si los valores de los pará-

metros estimados reproducen tan estrechamente como sea posible la matriz observada de covarianza (Kahn, 2006). Corresponde a la prueba de robustez del modelo para realizar la inferencia. Ver Tabla A4.1.5.

Tabla A4.1.5. Ajustes del programa para resolver el modelo

Missing data imputation algorithm:	Arithmetic Mean Imputation
Outer model analysis algorithm:	Robust Path Analysis
Default inner model analysis algorithm:	Warp3
Multiple inner model analysis algorithms used?	No
Resampling method used in the analysis:	Bootstrapping
Number of data resamples used:	100
Number of cases (rows) in model data:	111
Number of latent variables in model:	7
Number of indicators used in model:	35
Number of iterations to obtain estimates:	8
Range restriction variable type:	None
Range restriction variable:	None
Range restriction variable min value:	0.000
Range restriction variable max value:	0.000
Only ranked data used in analysis?	Yes

Índices de ajuste y calidad del modelo

Con el propósito de medir la eficiencia del SEM, se usa el análisis general de resultados mostrado por el *software*. En la medida en que se genera el modelo, se va ajustando y además de confirmar que los indicadores estudiados anteriormente estaban en los rangos de aceptación, se confirmó con estos análisis generales de resultados las relaciones entre los factores buscando el modelo que presentara el mejor ajuste de acuerdo con estos indicadores.

Así, con base en el modelo inicial se establecen diferentes relaciones que se van explorando hasta obtener el modelo que a juicio de la investigadora represente mejor el fenómeno o constructo general, la madurez, y produjera el mejor ajuste aceptado. Se acepta el modelo ajustado si los indicadores en conjunto presentan mejores resultados con respecto al modelo anterior. El modelo aceptado se presenta en la Figura A4.1.12. Los resultados para este modelo se presentan en la Tabla A4.1.6.

La calidad del modelo, conformado por los FM y sus relaciones, se identifica con ayuda de un grupo de indicadores con los cuales se conoce el nivel de ajuste a los datos obtenidos de los expertos. Estos son diez indicadores del desempeño del modelo los cuales se presentan en el Anexo 4.4. Con estos indicadores se valida el modelo. Es importante notar que los indicadores cuentan con un valor $P < 0.001$, que muestra una significancia de la

información obtenida de un mínimo del $1-0.001 = 0.999$, o el 99.9%. Esto quiere decir que con un nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, que corresponde al nivel de confianza de $1 - \alpha = 0.95$, por tanto, para el estudio realizado, cualquier valor P menor que $\alpha = 0.05$ es significativo para el análisis de las relaciones en el modelo. Esto también se verifica con la prueba de hipótesis.

Tabla A4.1.6. Resultados del desempeño del SEM (archivo de datos: EModel 111 VAR - Robust Path - V1.prj)

Indicador	Resultado	Criterio de aceptación
Average path coefficient (APC)	0.394	P<0.001
Average R-squared (ARS)	0.494	P<0.001
Average adjusted R-squared (AARS)	0.485	P<0.001
Average block VIF (AVIF)	1.481	acceptable if ≤ 5 , ideally ≤ 3.3
Average full collinearity VIF (AFVIF)	2.998	acceptable if ≤ 5 , ideally ≤ 3.3
Tenenhau GoF (GoF)	0.522	small ≥ 0.1 , medium ≥ 0.25 , large ≥ 0.36
Sympson's paradox ratio (SPR)	1.000	acceptable if ≥ 0.7 , ideally = 1
R-squared contribution ratio (RSCR)	1.000	acceptable if ≥ 0.9 , ideally = 1
Statistical suppression ratio (SSR)	1.000	acceptable if ≥ 0.7
Nonlinear bivariate causality direction ratio (NLBCDR)	1.000	acceptable if ≥ 0.7

Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realiza a todas las relaciones en el SEM, el concepto general es:

La hipótesis nula es

$$H_0: \beta_i = 0, \text{ no existe una relación directa entre las variables latentes.}$$

Y la hipótesis alterna es

$$H_1: \beta_i \neq 0, \text{ existe una relación directa entre las variables latentes.}$$

Para realizar la prueba de hipótesis, se calcula el valor de z. Se requiere el valor numérico de la media poblacional y la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra.

$$z = (x - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$$

Al obtener el valor de z , se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar y se encuentra el valor P . Este valor P se compara con el nivel de significancia α definido, que para este caso es $\alpha = 0.05$ y, al comparar, se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Con valores P menores de 0.05 , NO se acepta la hipótesis nula; por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna: “Existe una relación directa y positiva entre las variables latentes”.

Intervalo de confianza

Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los parámetros de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_i \pm Z * \delta$$

Donde, δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$.

Para nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, se calcula el área de la distribución normal sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0.975$, luego se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar el valor de Z , el $Z\alpha/2$ correspondiente es de $Z\alpha/2$ que es igual a 1.96 .

El límite inferior del intervalo es:

$$LI = \beta_i - 1.96 * \delta$$

El límite superior del intervalo es:

$$LS = \beta_i + 1.96 * \delta$$

Si el intervalo de confianza incluye el cero, se tiene la certeza que la β_i NO es significativa.

Determinación de las ecuaciones estructurales

El modelo de medida está conformado por los atributos que identifican o explican a los FM. Los atributos se identifican con X_i y los FM con Y_j . Los FM (o variables endógenas) van ordenadas de menor a mayor según el grado de cercanía con respecto de los atributos (variables exógenas). Los FM con $Y_j < Y_{j+1}$ influyen en la definición de otros FM, los cuales se explican

por los atributos relacionados y la influencia de los FM de los que ellos dependen.

El efecto de los atributos con respecto de los FM se indica por λ_{ji} , esta es la carga factorial (CF). El primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice corresponde al atributo emisor X_i . Con respecto de los FM, el efecto entre ellos se muestra con β_{ji} en la cual el primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice al emisor Y_{j-1} .

Entre los atributos no se consideran efectos; ellos no son causados por ninguna variable de miden directamente, así que la relación que existe entre ellos se expresa por el coeficiente de correlación. Entre ellas solo se presenta covariación, sin que se especifique la fuente de variabilidad.

Respecto de los errores, estos se pueden identificar en los atributos y en los FM. Los errores asociados a los atributos se representan por δ_i , donde el subíndice corresponde al Atributo X_i . De igual manera, ζ_j corresponde al error asociado con el FM Y_j . **Más adelante se hará referencia a los errores y su tratamiento en la investigación realizada.**

Por ejemplo: la ecuación estructural para el FM, CommTM, identificado como Y_1 , viene dada por:

$$Y_1 = \sum \lambda_{1i} X_i + \zeta_1$$

Donde X_i : ($X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$) i corresponde a los atributos que explican al FM Y_1 .

De igual manera, la ecuación para el FM, LeaderSh denominado como el FM Y_2 , se compone de los atributos que lo explican y el efecto directo de Y_1 representado por β_{21} .

$$Y_2 = \sum \lambda_{2i} X_i + \beta_{21} Y_1 + \zeta_2$$

Donde X_i : ($X_{19}, X_{20}, X_{21}, X_{22}$) i corresponde a los atributos que explican al factor Y_2 .

Para los demás FM, cada una de las ecuaciones considera los efectos de los atributos asociados con cada uno de ellos, el efecto directo de los FM causa y adicionalmente los efectos indirectos de los FM ubicados entre dos y seis segmentos atrás del FM endógeno que recibe el efecto. En la siguiente sección, luego de la identificación de las relaciones entre los elementos de madurez, se presentan las ecuaciones estructurales.

Expresión matricial de las ecuaciones estructurales del modelo

La notación para las expresiones matemáticas de las ecuaciones estructurales más utilizada es la notación Lisrel¹⁵ y hace uso de letras griegas, las cuales se usan en minúscula para desplegar las ecuaciones y en mayúscula para denotar las matrices. En ella los constructos o variables latentes o para la investigación realizada factores de madurez (FM). En Lisrel se presentan las letras que denotan estas ecuaciones, este es un documento de la Portland State University.

El SEM se compone de dos modelos, el modelo de medida o externo u Outer Model y el modelo estructural o Interno o Inner Model.

Modelo estructural

El modelo estructural tiene la forma:

$$\eta = \Gamma\xi + B\eta + \zeta$$

Esta forma representa las matrices asociadas, donde:

η : (Eta) Variables latentes endógenas, FM endógenos.

Γ : (Gamma) Se refiere a la matriz $q \times r$ de coeficientes de regresión entre variables latentes exógenas, FM exógenos y variables latentes endógenas, FM endógenos.

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas, FM exógenos.

B : (Beta) Es una matriz de $q \times q$, una matriz de coeficientes de regresión entre variables latentes endógenas, FM endógenos.

ζ : (Zeta) Alteraciones, o errores debidas a las variables endógenas, FM endógenos.

La expresión matricial se desarrolla con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

γ : Trayectoria causal de una variable latente exógena a una variable latente endógena.

β : Trayectoria causal entre variables latentes endógenas.

¹⁵ Lisrel es el acrónimo de Linear Structural Relations. Es un programa usado en SEM. Desarrollado en la década del 70 por Karl Jöreskog y Dag Sörbom, (Jöreskog, 1993) profesores de la Universidad de Upsala, Suecia. Lo distribuye la empresa SSI (Scientific Software International).

Matrices de ecuaciones para el modelo estructural

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \times \xi_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{31} & 0 & 0 & \beta_{34} & 0 & 0 \\ \beta_{41} & \beta_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{62} & \beta_{63} & 0 & \beta_{65} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ \zeta_5 \\ \zeta_6 \end{bmatrix}$$

Modelo de medida

El modelo de medida se compone de las variables observadas, o medidas, atributos, relacionadas con las variables latentes exógenas, FM exógenos, y las variables observadas, atributos, relacionadas con las variables latentes endógenas, FM endógenos.

$$\xi = \Lambda_x x + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y y + \epsilon$$

Estas formas representan las matrices para cada una de las relaciones descritas, donde:

X: El resultado de la suma de las cargas factoriales de multiplicadas por los atributos x. Esto explica la variable latente exógena, FM exógeno.

Y: El resultado de la suma de las cargas factoriales multiplicadas por los atributos y. Esto explica la variable latente endógena, FM endógeno.

Λ_x : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, atributos. Los x que explican las variables latentes exógenas, FM exógeno, el ξ .

Λ_y : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, atributos. Los y que explican las variables latentes endógenas, FM endógeno, el η .

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas, FM exógenos,

η : (Eta) Variables latentes endógenas, FM Endógenos.

δ : (Delta) Alteraciones, o errores, debidas a las variables observadas o medidas x, atributos, relacionadas con la variable latente exógena, FM exógeno.

ϵ : (Épsilon) Alteraciones, o errores debidas a las variables observadas o medidas y, atributos, relacionadas con la variable latente endógena, FM endógeno.

Las expresiones matriciales se desarrollan con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM exógeno - CommTM**

$$\xi_1 = [\lambda_{9\ 1} \quad \lambda_{10\ 1} \quad \lambda_{11\ 1} \quad \lambda_{12\ 1}] \begin{bmatrix} x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - LeaderSh**

$$\eta_1 = [\lambda_{19\ 2} \quad \lambda_{20\ 2} \quad \lambda_{21\ 2} \quad \lambda_{22\ 2}] \begin{bmatrix} x_{19} \\ x_{20} \\ x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{19} \\ \epsilon_{20} \\ \epsilon_{21} \\ \epsilon_{22} \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - SupporOp**

$$\eta_2 = [\lambda_{1\ 3} \quad \lambda_{2\ 3} \quad \lambda_{3\ 3} \quad \lambda_{4\ 3} \quad \lambda_{5\ 3}] \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - TeamWork**

$$\eta_3 = [\lambda_{13\ 3} \quad \lambda_{14\ 3} \quad \lambda_{15\ 3} \quad \lambda_{16\ 3} \quad \lambda_{17\ 3} \quad \lambda_{18\ 3}] \begin{bmatrix} x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \\ x_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{13} \\ \epsilon_{14} \\ \epsilon_{15} \\ \epsilon_{16} \\ \epsilon_{17} \\ \epsilon_{18} \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - WorkEnv**

$$\eta_4 = [\lambda_{64} \quad \lambda_{74} \quad \lambda_{84}] \begin{bmatrix} x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_6 \\ \epsilon_7 \\ \epsilon_8 \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno – SPImprov**

$$\eta_5 = [\lambda_{235} \quad \lambda_{245} \quad \lambda_{255} \quad \lambda_{265} \quad \lambda_{275} \quad \lambda_{285} \quad \lambda_{295}] \begin{bmatrix} x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \\ x_{28} \\ x_{29} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{23} \\ \epsilon_{24} \\ \epsilon_{25} \\ \epsilon_{26} \\ \epsilon_{27} \\ \epsilon_{28} \\ \epsilon_{29} \end{bmatrix}$$

**Matrices de ecuaciones para el modelo de medida
FM endógeno - ProImpr**

$$\eta_6 = [\lambda_{306} \quad \lambda_{316} \quad \lambda_{326} \quad \lambda_{336} \quad \lambda_{346} \quad \lambda_{356}] \begin{bmatrix} x_{30} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{30} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{34} \\ \epsilon_{35} \end{bmatrix}$$

Ensamble de las ecuaciones estructurales en notación Lisrel

El SEM resulta de los modelos de medida y del modelo estructural, sus ecuaciones se agregan para conformar las ecuaciones del modelo, según la estructura siguiente.

Modelo de medida

$$\xi = \Lambda_x x + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y y + \epsilon$$

Modelo estructural

$$\eta = \Gamma\xi + B\eta + \zeta$$

PUNTOS CLAVE

Los atributos se encuentran adecuadamente correlacionados y explican el FM. Se confirma la validez de los FM con los indicadores del SEM para estas variables y se confirma la validez del SEM lo cual es el primer paso que lleva a considerar que las relaciones identificadas con este método explican el fenómeno de madurez de LC en la GPC. De igual forma podrá explicarse cualquier otro fenómeno de madurez en cualquier sector al utilizar este modelo en su condición de modelo genérico de evolución.

**CARGAS FACTORIALES DE LOS ATRIBUTOS DE
MADUREZ QUE EXPLICAN LOS
FACTORES DE MADUREZ**

*Tabla A4.2. Cargas factoriales normales de las variables observadas.
Cargas combinadas y cargas cruzadas*

	X_i	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SPIIm- prov	Pro Impr	SE	Valor P
LL2	X_1	0.715	0.401	0.511	0.362	0.560	0.260	0.525	0.127	<0.001
PS2	X_2	0.768	0.511	0.414	0.344	0.394	0.328	0.465	0.144	<0.001
TW2	X_3	0.792	0.445	0.374	0.312	0.431	0.205	0.384	0.106	<0.001
TW1	X_4	0.737	0.428	0.301	0.280	0.393	0.126	0.341	0.133	<0.001
LL3	X_5	0.710	0.320	0.433	0.418	0.356	0.365	0.549	0.126	<0.001
WE1	X_6	0.453	0.738	0.459	0.480	0.520	0.338	0.448	0.111	<0.001
WE2	X_7	0.403	0.729	0.346	0.361	0.414	0.227	0.394	0.082	<0.001
WS2	X_8	0.385	0.725	0.299	0.403	0.392	0.211	0.454	0.085	<0.001
HMC1	X_9	0.507	0.397	0.828	0.571	0.477	0.369	0.619	0.102	<0.001
HMC2	X_{10}	0.502	0.448	0.832	0.612	0.417	0.472	0.674	0.091	<0.001
HMC3	X_{11}	0.456	0.429	0.718	0.390	0.607	0.287	0.499	0.092	<0.001
IBP1	X_{12}	0.168	0.235	0.616	0.652	0.130	0.659	0.479	0.083	<0.001
INN2	X_{13}	0.310	0.329	0.607	0.725	0.264	0.596	0.558	0.076	<0.001
SCLO2	X_{14}	0.418	0.445	0.562	0.813	0.260	0.579	0.659	0.075	<0.001
IBP4	X_{15}	0.474	0.576	0.520	0.773	0.339	0.420	0.535	0.096	<0.001
IBP3	X_{16}	0.150	0.270	0.478	0.727	0.067	0.674	0.507	0.082	<0.001
CIF1	X_{17}	0.309	0.429	0.555	0.833	0.220	0.609	0.607	0.077	<0.001
IBP2	X_{18}	0.426	0.520	0.640	0.652	0.343	0.299	0.519	0.101	<0.001
LDC2	X_{19}	0.509	0.425	0.386	0.181	0.773	0.234	0.429	0.100	<0.001
A1	X_{20}	0.405	0.400	0.461	0.208	0.767	0.297	0.506	0.111	<0.001

	X_i	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SPIm-prov	Pro Impr	SE	Valor P
LL1	X_{21}	0.479	0.500	0.531	0.365	0.729	0.341	0.490	0.099	<0.001
A2	X_{22}	0.262	0.421	0.195	0.200	0.617	0.226	0.163	0.096	<0.001
PIM2	X_{23}	0.215	0.188	0.483	0.552	0.311	0.826	0.560	0.089	<0.001
WI4	X_{24}	0.259	0.240	0.425	0.514	0.234	0.804	0.565	0.081	<0.001
WI3	X_{25}	0.263	0.313	0.458	0.529	0.291	0.802	0.630	0.073	<0.001
FC3	X_{26}	0.280	0.251	0.491	0.587	0.226	0.780	0.561	0.084	<0.001
PIM1	X_{27}	0.173	0.280	0.445	0.512	0.277	0.756	0.529	0.082	<0.001
PIM3	X_{28}	0.359	0.352	0.498	0.463	0.468	0.704	0.526	0.120	<0.001
PIM4	X_{29}	0.271	0.245	0.348	0.547	0.197	0.601	0.472	0.091	<0.001
WPS1	X_{30}	0.359	0.306	0.599	0.632	0.261	0.587	0.767	0.085	<0.001
TU1	X_{31}	0.356	0.402	0.646	0.630	0.439	0.629	0.740	0.088	<0.001
WI1	X_{32}	0.385	0.377	0.537	0.537	0.478	0.755	0.739	0.100	<0.001
FC1	X_{33}	0.421	0.477	0.547	0.545	0.347	0.383	0.733	0.072	<0.001
PPC2	X_{34}	0.481	0.528	0.467	0.460	0.437	0.406	0.701	0.115	<0.001
FC2	X_{35}	0.654	0.490	0.515	0.463	0.438	0.423	0.685	0.127	<0.001

VALIDEZ DE LA INFORMACIÓN PARA LOS FACTORES DE MADUREZ

Es importante verificar la validez de los FM del modelo para su interpretación. No se recomienda realizar el análisis sin verificar que las variables son válidas y por tanto que el modelo es válido. Tabla A4.3.1.

Tabla A4.3.1. Estadísticos del SEM. Software WarpPLS 6.0. Coeficientes de los factores

Estadístico	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impro
R-Squared	0.539	0.469		0.890	0.311	0.522	0.706
Adj. R-Squared	0.530	0.459		0.887	0.305	0.513	0.698
Composite realib.	0.862	0.774	0.838	0.888	0.814	0.903	0.871
Cronbach's Alpha	0.799	0.563	0.738	0.848	0.693	0.873	0.822
Avg. Var. Extract.	0.555	0.534	0.568	0.572	0.525	0.573	0.530
Full collin. VIF	1.975	2.402	3.305	4.103	2.358	2.737	4.298
Q-squared	0.542	0.476		0.654	0.316	0.518	0.707
Min	-5.380	-3.334	-3.652	-3.680	-3.885	-3.544	-3.902
Max	1.271	1.529	1.400	1.760	1.492	1.532	1.449
Median	0.208	0.265	0.069	0.227	0.299	0.170	0.169
Mode	1.271	0.365	1.070	0.021	0.770	-0.193	-0.328
Skewness	-2.154	-1.075	-0.940	-1.044	-1.487	-0.991	-1.353
Exc. Kurtosis	8.051	1.842	0.915	1.738	2.438	0.846	2.258
Unimodal – RS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Unimodal – KMW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Normal – JB	No	No	No	No	No	No	No
Normal – RJB	No	No	No	No	No	No	No

R-CUADRADA Y R-CUADRADA AJUSTADA

La *validez predictiva* se analiza con estos dos indicadores. Ellos están presentes en los factores dependientes. Estos dos índices son paramétricos, el R-Squared no toma en cuenta el tamaño de la muestra en tanto que el Adjusted R-Squared sí la toma en cuenta. La diferencia entre estos dos indicadores no debe ser mayor al 5%, pues se estaría presentando un problema respecto del tamaño de la muestra y se debería disponer de una muestra más grande. Estos valores deben ser muy cercanos. En SEM en ingeniería, a diferencia de modelos de regresión lineal que exigen un nivel de predicción de más del 75%, es aceptable que el R-Squared explique al menos el 0.2, o el 20%, esto debido a que el nivel de complejidad es más grande, son muchas variables explicando a muchas otras.

De acuerdo con (Cohen, 1988; Kock y Lynn, 2012; y Kock, 2017) si los valores de los coeficientes de R-Squared y Adjusted R-Squared están por debajo de 0,02 sugieren efectos combinados de predictores en bloques variables latentes que son demasiado débiles para ser considerados relevantes desde un punto de vista práctico. Sin embargo, para modelos en ingeniería se recomienda que este valor este por encima de 0.2 (García, 2011; Cupani, 2012).

En este caso todos los valores de estos dos índices están por encima de 0.2 con lo que se confirma que hay suficiente validez predictiva. De igual manera, se verifica que no hay efectos combinados de predictores para todas las variables latentes en el modelo.

CONFIABILIDAD COMPUESTA Y ALPHA DE CRONBACH

Estos dos indicadores evalúan la confiabilidad del instrumento de medición y se deben analizar de manera conjunta. La confiabilidad es una medida de la calidad de un instrumento de medición. Puede decirse que el instrumento de medición tiene una buena confiabilidad si las preguntas se entienden de la misma manera por diferentes encuestados. Se aplican solo a las variables latentes.

El Alpha de Cronbach mide la *validez interna* para así confirmar cuales de las variables agrupadas deberían estar en el factor. Este indicador usa las varianzas sin estandarizar y si hay diferentes variables con diferentes escalas, hay problemas con la calidad del índice. De otra parte, el Composite Reliability (También llamado el Cronbach estandarizado) mide exactamente lo mismo, pero con valores estandarizados. Los indicadores de

Composite Reliability y Alpha Cronbach deberían ser iguales o superiores a 0,7 (Fornell y Larcker, 1981; Nunnally, 1978; Nunnally y Bernstein, 1994; Kock, 2017; Kock y Lynn, 2012) y si estos índices se acercan a 1.0 es mejor. Sin embargo, la versión más relajada de este criterio utilizada ampliamente considera que uno de los dos coeficientes debe ser igual o mayor que 0,7 (Kock y Lynn, 2012). Lo que generalmente se aplica al Composite Reliability, que suele ser el más alto de los dos (Fornell y Larcker, 1981; Kock y Lynn, 2012).

Como se puede confirmar en la Tabla A4.3.1, los dos indicadores cumplen con el valor por encima de 0.7, con excepción del Alpha Cronbach para WorkEnv 0.563; sin embargo, al considerar la versión relajada, el Composite Reliability es de 0.774, lo que sugiere que esta y todas las variables latentes cuentan con validez interna.

VARIANZA PROMEDIO EXTRAÍDA, AVE

Se utiliza para la medir la validez discriminante (o validez divergente) y la validez convergente. Es una forma de medir si las variables observadas están bien valoradas. La validez discriminante es un criterio utilizado para evaluar las escalas de medida de estos FAM. “La validez discriminante prueba que los constructos que no deberían tener ninguna relación, de hecho, no la tienen, en tanto que la validez convergente prueba que los constructos que se espera que estén relacionados, lo estén. Para la evaluación de validez convergente es aceptable el 0.5” (Fornell y Larcker, 1981; Kock y Lynn, 2012), y se aplica solo a los atributos en condición de variable reflectiva.

Como se ve en la tabla, estos valores para todas las variables latentes están por encima de 0.5, lo que muestra que las variables observadas están adecuadamente valoradas.

CORRELACIONES ENTRE FACTORES Y ERRORES

Esta correlación se utiliza para conocer qué tanto un factor puede explicar a otro. En esta tabla se identifican. Para esto se hace uso de la matriz de correlaciones, en la cual la diagonal está conformada por las raíces cuadradas de las varianzas promedio de cada factor. En la Tabla A4.3.1, se muestran los AVE para cada factor, los cuales corresponden a cada uno de los valores de la diagonal de la matriz mostrada en la Tabla A4.3.2, elevados al cuadrado respectivamente. Por ejemplo: el AVE de CommTM = 0.568 corresponde

a $\sqrt{0.568} = 0.754$, valor ubicado en la posición de CommTM. Confirmando así que el instrumento de valoración cuenta con buena validez discriminante y que las preguntas respecto de la importancia del atributo en la madurez de LC fueron entendidas por los encuestados.

El criterio de aceptación fue evaluado en el aparte anterior; sin embargo, hay otro criterio que debe ser revisado para cada FM. Se trata que cada valor en la diagonal debe ser mayor que cualquiera de las correlaciones que involucran ese FM (Fornell y Larcker, 1981; Kock, 2017; Kock y Lynn, 2012). En el modelo, para el valor correspondiente a compromiso de la alta gerencia (CommTM) está mostrando que existe otro valor más alto en la columna y la fila cruzadas con su ubicación correspondiente a mejoramiento de la producción (ProImpr). Esto hace sospechar de un atributo colineal.

Se debe ir a la Tabla A4.3.2 de cargas combinadas y cargas cruzadas para identificar con ayuda del FA el atributo que presenta problemas. Un atributo candidato a eliminarse es aquel que cuente con una carga factorial más alta en otro de los factores diferentes a aquel donde está ubicado.

El atributo del que se sospechó colinealidad está completamente identificado y es IBP1, con respecto del cual se decidió dejar en el factor compromiso de la alta gerencia (CommTM) después de demostrar que en este factor aporta más a la robustez del modelo y por tanto esa es la localización correcta para la identificación de la madurez de LC en la GPC.

Tabla A4.3.2. Correlación entre los FM con la raíz cuadrada de los AVE. El valor P de todas estas correlaciones es $P < 0.001$ sin excepción

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork	(0.745)	0.566	0.546	0.461	0.573	0.345	0.608
WorkEnv	0.566	(0.730)	0.504	0.568	0.605	0.355	0.591
CommTM	0.546	0.504	(0.754)	0.743	0.545	0.597	0.758
SupporOp	0.461	0.568	0.743	(0.756)	0.330	0.703	0.749
LeaderSh	0.573	0.605	0.545	0.330	(0.724)	0.380	0.550
SPImprov	0.345	0.355	0.597	0.703	0.380	(0.757)	0.729
ProImpr	0.608	0.591	0.758	0.749	0.550	0.729	(0.728)

De manera complementaria se debe revisar los VIF ubicados en la diagonal de la Tabla A4.3.3. Los VIF en la diagonal deben ser iguales o menores que 3.3. Con lo cual se garantiza que no hay problemas de colinealidad (Kock y Lynn, 2012) ni existen factores de confusión, no se presentan problemas de causalidad.

En la Tabla A4.3.3, se muestran las correlaciones entre los términos de error del factor asociados con los términos de error en la diagonal. Con esta

tabla se pueden identificar términos de error altamente correlacionados que sugieren la existencia de factores de confusión.

Tabla A4.3.3. Correlación entre los términos de error de la variable latente y los VIF

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork	(1.056)	-0.086	0.031	0.044	-0.166	-0.080	(1.056)
WorkEnv	-0.086	(1.076)	0.015	-0.079	-0.219	0.026	-0.086
CommTM	0.031	0.015	(1.036)	-0.045	0.065	-0.168	0.031
SupporOp	0.044	-0.079	-0.045	(1.052)	0.002	0.199	0.044
LeaderSh	-0.166	-0.219	0.065	0.002	(1.096)	-0.007	-0.166
SPImprov	-0.080	0.026	-0.168	0.199	-0.007	(1.079)	-0.080
ProImpr	(1.056)	-0.086	0.031	0.044	-0.166	-0.080	(1.056)

COLINEALIDAD COMPLETA, VIF

El índice de inflación de la varianza permite la identificación de la colinealidad vertical y lateral, o la multicolinealidad. Involucra a todas las variables latentes en un modelo; es una condición que hay al interior de las variables latentes. “Los VIF de colinealidad completa que sean menores o iguales a 3.3 sugieren la multi-colinealidad completa en el modelo y ningún sesgo de método común” (Kock, 2017; Kock y Lynn, 2012). Un criterio relajado sugiere que los VIF pueden ser menores o iguales a 5 (Hair y Anderson, 1992; Hair *et ál.*, 1999; Kline, 2011; Hair *et ál.*, 1995;). Aunque se dispone de un criterio aún más relajado y permite que sean inferiores a 10 (Hair y Anderson, 1992; Hair *et ál.*, 1999).

Es recomendable que, para obtener un FM, este se conforme por un grupo 7 ± 2 atributos. Se debe evitar definir un FM por un solo Atributo. Se recomienda contar con un grupo entre 5 y 9 atributos, pues en la medida en que el FM se define por 9 o más atributos se amplía la posibilidad de tener más variables colineales.

Este modelo cuenta con VIF que varían entre 1.975 y 4.298, ver Tabla A4.3.1, los cuales se encuentran en los rangos aceptables para los FM según el criterio de aceptación. Las variables SupporOp con 4.103 y ProImpr con 4.298 se analizan con el criterio relajado ≤ 5 .

En el WarpPLS es posible identificar las variables que están presentando colinealidad. Se usa la opción Indicator Weights que despliega una tabla en la cual se identifican los atributos asociados a cada FM. En la columna VIF de cada atributo se escoge aquel que cuente con el valor más alto. Esta es la

candidata para eliminar por sospecha de colinealidad. Entonces se procede a retirarla del FM y se corre el modelo. El VIF asociado debería mejorar.

Sin embargo, para mejorar este indicador en el modelo se podrían eliminar algunos atributos que contengan información repetida (se pregunta lo mismo con diferente texto). Este no es el caso en el estudio realizado, pues los atributos están preguntando cosas diferentes. De otra parte, al revisar la correlación entre los atributos, como se puede confirmar en la matriz de correlaciones, se verifica que ninguna cuenta con un valor de correlación cercano a 0.9. Los atributos con alta colinealidad se pueden identificar en la matriz de correlaciones de tal manera que una correlación mayor a 0.9 indica un alto nivel de colinealidad y este criterio puede usarse para eliminar uno de los atributos en cuestión.

Para el SEM de LC en la GPC, se decidió avanzar con el criterio relajado y aceptar valores ≤ 5 para este indicador.

FACTORES DE INFLACIÓN DE VARIANZA DE BLOQUE

Este indicador se obtiene para cada FM que tienen dos o más predictores en un bloque de FM. Este indicador no se calcula para FM con un predictor o sin predictor. Cada VIF se asocia con uno de los dos o más predictores y se relaciona con el vínculo entre ese predictor y su FM. Si un FM del predictor apunta a dos o más FM diferentes en el modelo, ese FM tiene múltiples criterios asociados con ella. Tabla A4.3.4.

Tabla A.4.3.4. Factores de inflación de la varianza de bloque.

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	1.410	1.410					
WorkEnv		1.541	1.541				
SupporOp	1.651	2.082		1.965			
SPImprov		1.151			1.151		
ProImpr			1.426		2.257	2.244	

Este indicador es la medida del nivel de colinealidad “vertical” (Kock y Lynn, 2012), o redundancia, entre los factores que tienen la hipótesis de afectar a otro factor. Los VIF de bloque deben estar por debajo de 3.3. “Este tipo clásico de colinealidad se refiere a la colinealidad predictora-predictiva

en un bloque variable latente que contiene uno o más predictores variables latentes y un criterio de variable latente” (Kock, 2017).

EL COEFICIENTE Q-CUADRADO

Es una medida no paramétrica; es una prueba de validez predictiva o relevancia, no paramétrica. No tiene en cuenta el tamaño de la muestra. Es una prueba asociada a cada bloque de FM en el modelo, a través del FM endógeno que es la variable de criterio en el bloque (Kock, 2017); (Kock y Gaskins, 2014). Este indicador es aceptable en relación con un FM endógeno con un coeficiente mayor que cero.

Si llegase a suceder que Q-Squared sea menor que cero, es un indicativo de que el sentido de la relación no está bien propuesta. En el modelo, todos los valores Q-Squared están por encima de 0.316 que es mayor a cero, lo que hace que este indicador sea aceptado como un buen desempeño del modelo.

ASIMETRÍA / KURTOSIS

Las distribuciones de los FM son unimodales y no son normales. Estas pruebas se aplican a los FM, que son combinaciones de atributos y errores de medición. Los resultados de estas pruebas se pueden ver como resultados de pruebas de normalidad y multimodalidad “multivariantes” lo cual se debe al uso de los algoritmos que permiten la utilización del modelo lineal. Para determinar la normalidad univariada, se examina la distribución de cada FM y analizar los índices de asimetría (Skewness) y kurtosis.

Los valores de asimetría deben ser inferiores a 3, los cuales se confirman para todos los FM del modelo y el índice de kurtosis o kurtosis con valores inferiores a 10 (Kline, 2011). El índice de kurtosis en la Tabla A4.3.1 presenta un valor máximo de 8.051 para el FM TeamWork; sin embargo, es inferior a 10, Por lo que se valida este índice con el criterio más relajado. A continuación, las figuras para cada uno de los FM. Ver Figuras A4.3.1 aA4.3.7.

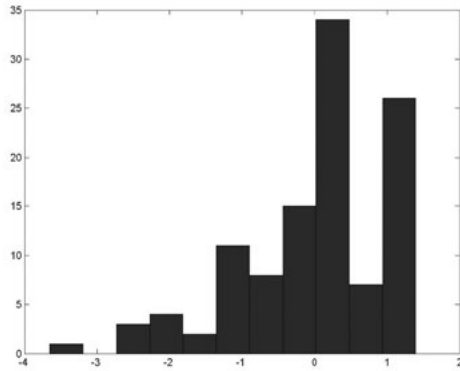


Figura A4.3.1. Histograma para CommTM. Asimetría -0.940 y kurtosis 0.915

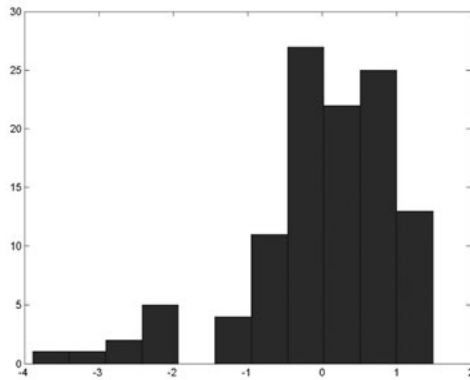


Figura A4.3.2. Histograma para LeaderSh. Asimetría -1.487 y kurtosis 2.438

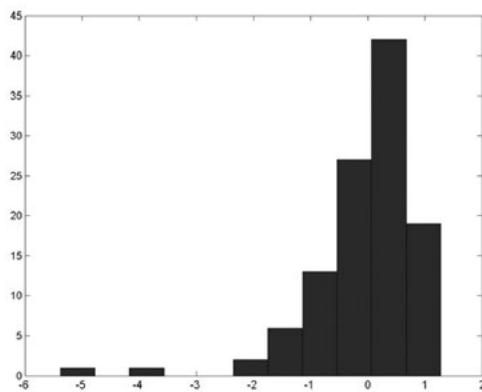


Figura A4.3.3. Histograma para TeamWork. Asimetría -2.154 y kurtosis 8.051

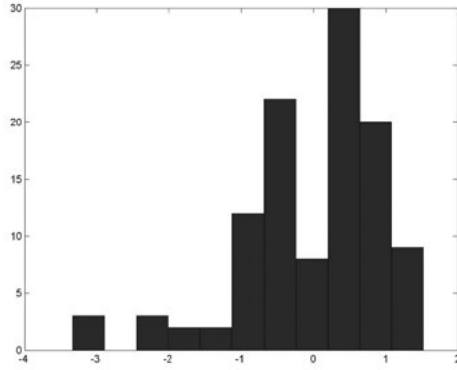


Figura A4.3.4. Histograma para WorkEnv. Asimetría -1.075 y kurtosis 1.842

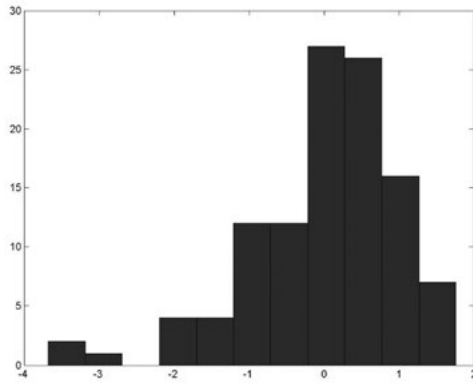


Figura A4.3.5. Histograma para SupporOp. Asimetría -1.044 y kurtosis 1.738

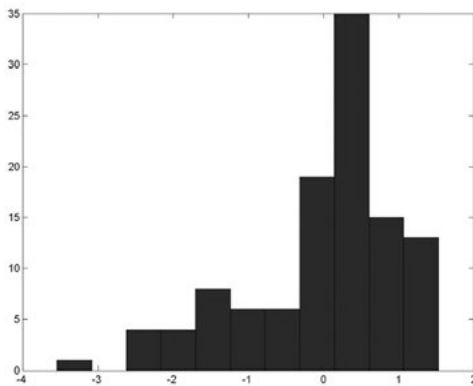


Figura A4.3.6. Histograma para SPImprov. Asimetría -0.991 y kurtosis 0.846

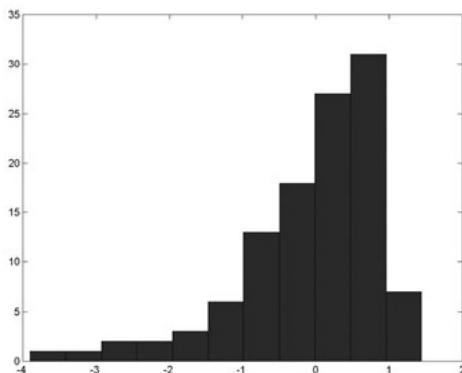


Figura A4.3.7. Histograma para ProImpr. Asimetría -1.353 y kurtosis 2.258

Relaciones entre los factores de madurez

Es importante estudiar las relaciones entre los FM; esto se puede realizar gráficamente. Se seleccionan valores estandarizados. En la Tabla A4.3.5, se presentan el tipo de relaciones del modelo. Todas las relaciones entre FM corresponden a relaciones deformadas o no lineales, no hay relaciones lineales.

Tabla A4.3.5. Tipos de relaciones en el modelo

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork			Warped		Warped		
WorkEnv	Warped				Warped		
CommTM							
SupporOp		Warped	Warped		Warped		
LeaderSh			Warped				
SPImprov				Warped	Warped		
ProImpro	Warped			Warped		Warped	

Relación entre el FM ompromiso de la Alta Gerencia (CommTM) y Soporte Operativo (SupporOp)

Esta es la relación con el β mayor en el modelo. La curva es cóncava, una curva u, y se mueve entre -3.6 desviaciones estándar hasta 1.4 desviaciones estándar. Esta relación muestra un crecimiento ascendente donde los datos se recargan hacia la derecha. Figura A4.3.8. En la medida en que CommTM aumenta, el efecto en el FM SupporOp también aumenta de manera sostenida, la influencia del primer factor en el segundo es grande.

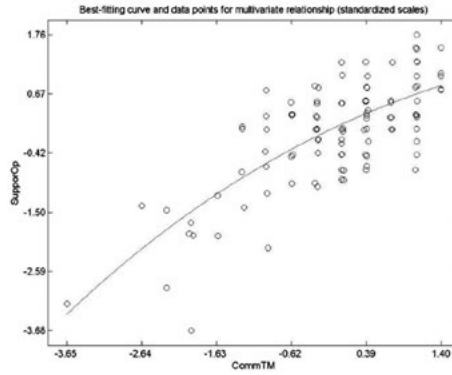


Figura A4.3.8. Relación entre las variables CommTm Vs SupportOp

Relación entre el FM compromiso de la alta gerencia (CommTM) y liderazgo Lean (Lean Leader)

Es una curva u y un tramo recto y se mueve entre -3.6 desviaciones estándar hasta 1.4 desviaciones estándar. Esta relación muestra la influencia directa de CommTm en LeaderSh. Figura A4.3.9.

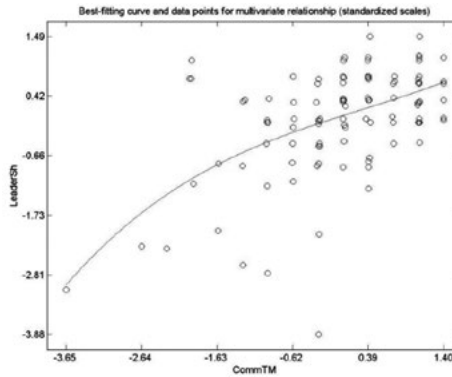


Figura A4.3.9. Relación entre las variables CommTm Vs. SupportOp

ÍNDICES DE AJUSTE Y CALIDAD DEL MODELO

La calidad del modelo, conformado por los factores y sus relaciones, se identifica con ayuda de un grupo de indicadores, con los cuales se conoce su nivel de ajuste a los datos obtenidos de los expertos. Estos son diez indicadores generales del desempeño del modelo, los cuales se analizan más adelante. Es importante para la explicación de los indicadores generales, abordar primero la explicación del valor P.

VALOR P

El valor P es la probabilidad bajo un modelo estadístico específico de que un resumen estadístico de los datos sea igual o más extremo que su valor observado (Wasserstein y Lazar, 2016). Corresponde a la probabilidad de que el estadístico sea posible bajo la hipótesis nula, si cumple con la condición de ser menor al nivel de significancia impuesto arbitrariamente, entonces la hipótesis nula será, eventualmente, rechazada.

Un valor P proporciona un enfoque para resumir la incompatibilidad entre un conjunto particular de datos y un modelo propuesto para los datos. El contexto más común es un modelo, construido bajo un conjunto de supuestos, junto con una llamada “hipótesis nula”. A menudo, la hipótesis nula postula la ausencia de un efecto, como la ausencia de diferencia entre dos grupos, o la ausencia de una relación entre un factor y un resultado. Cuanto menor es el valor de **P**, mayor es la incompatibilidad estadística de los datos con la hipótesis nula, si se cumplen los supuestos subyacentes utilizados para calcular el valor de

P. Esta incompatibilidad se puede interpretar como que pone en duda o proporciona evidencia contra la hipótesis nula o las suposiciones subyacentes (Wasserstein y Lazar, 2016).

El SEM sugiere que aquellos valores $P > 0.05$ deben ser descartados; sin embargo, para valores P entre 0.001 y 0.05 se puede decidir si la relación se tiene en cuenta para el estudio. Para valores superiores a 0.001, la decisión de mantener la relación obedece a la identificación de su importancia a partir de la conversación de la investigadora con algunos expertos en la etapa de entrevistas de manera complementaria a que la relación cumple con el criterio de valor $P < 0.05$.

Esto quiere decir que el nivel de significancia es $\alpha = 0.05$ y, por lo tanto, el nivel de confianza es $1 - \alpha = 0.95$, por tanto, para este estudio, cualquier valor P menor que $\alpha = 0.05$ es significativo para el análisis de las relaciones en el modelo.

PRUEBA DE HIPÓTESIS

Respecto de la prueba de hipótesis, esta es la consideración general para todas las relaciones del modelo estructural es la siguiente:

La hipótesis nula es

$H_0: \beta_i = 0$; no existe una relación directa entre las variables latentes.

Y la hipótesis alterna es

$H_1: \beta_i \neq 0$; existe una relación directa entre las variables latentes.

Para realizar la prueba de hipótesis, se calcula el valor de z . Se requiere el valor numérico de la media poblacional y la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra.

$$z = (x - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$$

Al obtener el valor de z , se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar y se encuentra el valor P . Este valor P se compara con el nivel de significancia α definido, que para este caso es $\alpha = 0.05$ y, al comparar, se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Con valores P menores de 0.05, NO se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna: “Existe una relación directa y positiva entre las variables latentes”.

INTERVALO DE CONFIANZA

Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los parámetros de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_i \pm Z * \delta$$

Donde δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$.

Para nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, se calcula el área de la distribución sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0.975$, se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar el valor de Z, el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es de $Z_{\alpha/2}$ que es igual a 1.96.

El límite inferior del intervalo es:

$$LI = \beta_i - 1.96 * \delta$$

El límite superior del intervalo es:

$$LS = \beta_i + 1.96 * \delta$$

Si el intervalo de confianza incluye el cero, se tiene la certeza que la β_i no es significativa.

Apc, ars y aars

el APC es el promedio de los valores absolutos de los coeficientes de las relaciones entre variables latentes. El ARS es el promedio de las R-Squared y el AARS es el promedio del R-Squared ajustado, este siempre es más bajo que el ARS debido al ajuste (Theil, 1958; Wooldridge, 1991).

En la medida en que se agreguen variables latentes al modelo, el APC disminuye y el ARS aumenta; estos indicadores se compensan entre sí (Kock, 2017). De otra parte, se puede buscar un aumento en estos indicadores si las variables que se integran mejoran la calidad de predicción y explicación del modelo; sin embargo, el modelo cuenta con las variables justas resultado de la validación racional aplicada al estudio realizado.

Los valores P para estos indicadores son menores que 0.001 lo cual muestra que estos indicadores son significativos.

Vif y afvif

el VIF y el AFVIF miden la multicolinealidad completa. En el SEM, los valores son respectivamente 1.481 y 2.998, los cuales son inferiores a 3.3, mostrando que los factores están midiendo diferentes constructos, no hay colinealidad entre ellos.

GoF - (Tenenhaus GoF)

El poder explicativo del modelo de 0.522 está por encima del recomendado de 0.36. Esto es que el modelo explica ampliamente el fenómeno de madurez con lo cual se puede hacer uso de él para desarrollar los artefactos que componen el modelo de evolución. Este índice también recibe el nombre de índice de comunalidad para un factor; sin embargo, aquí se calcula para el modelo como la suma de las cargas cuadradas del factor, cada carga asociada con un indicador, dividida por el número de indicadores.

SPR

Este indicador mide el grado en que el modelo está libre de las instancias paradójicas de Simpson (Kock, 2017; Kock y Gaskins, 2014; Pearl, 2009; Wagner, 1982). El SPR es 1.000, lo que significa que el 100% de las rutas en un modelo están libres de la paradoja de Simpson. Por lo tanto, no hay coeficientes de ruta y relaciones con signos diferentes. Por lo que las rutas del modelo son correctas.

El índice RSCR

Cuando una variable latente predictor realiza una contribución negativa a la R² de una variable latente de criterio, esto significa que el predictor está realmente reduciendo el porcentaje de varianza explicado en el criterio. Tal reducción toma en consideración las contribuciones de todos los predictores más la del residual. Este índice es similar al SPR. La diferencia clave es que se calcula en base a los valores reales de las contribuciones R-cuadrado, no en el número de rutas en las que estas contribuciones tienen signos específicos.

El RSCR se calcula dividiendo la suma de las contribuciones R-Squared positivas en un modelo por la suma de las contribuciones R² absolutas (ya sean negativas o positivas). Para este modelo el valor de 1.000 significa que la suma de las contribuciones R² positivas en un modelo constituye el

100% de la suma total de las contribuciones absolutas de R2 en el modelo y no hay presencia de contribuciones de R2 negativas.

El índice SSR

El valor de SSR es igual a 1.0 lo que significa que el 100% de las rutas en un modelo están libres de supresión estadística (Kock y Gaskins, 2014; MacKinnon *et ál.*, 2000). Esto significa que los coeficientes de ruta son menores, en términos absolutos, que la correlación asociada al par de factores. No hay problemas de causalidad, las relaciones de causalidad son correctas.

El NLBCDR

“El índice NLBCDR es una medida del grado en que los coeficientes de asociación bivariados no lineales proporcionan respaldo para las direcciones hipotéticas de los enlaces causales en un modelo” (Kock, 2017).

El valor del NLBCDR es 1.0, lo que significa que el 100% de las instancias relacionadas con la ruta en un modelo, el soporte para la dirección hipotética de causalidad invertida es débil.

Sobre el ajuste del modelo

En general, con relación a los indicadores analizados puede afirmarse que el SEM está ajustado y ofrece información confiable para el uso del modelo. De esta manera, se puede decir que el modelo permite identificar las relaciones entre las variables relacionadas con la madurez de LC en la GPC y a partir de este modelo construir un índice que permita conocer con ayuda de un modelo de calificación de los atributos de madurez de manera individual, el nivel de madurez de los factores de manera local y del modelo en general.

Re-especificación del modelo

A partir del modelo empírico se revisaron diferentes configuraciones de relaciones en el modelo para buscar el mejor ajuste posible. Las variables latentes son independientes y mutuamente excluyentes (no tan colineales); entre ellas se mide el concepto general de interés, en este caso la madurez, esto hace más robusto el modelo.

RELACIONES DIRECTAS E INDIRECTAS ENTRE LOS FACTORES DE MADUREZ

RELACIONES DIRECTAS ENTRE LOS FACTORES DE MADUREZ

Una de las características más valiosas del SEM es la capacidad de identificar las relaciones entre las variables latentes que lo componen; para la investigación realizada, los factores de madurez (FM). Estas relaciones muestran los efectos directos e indirectos que uno o más FM tienen sobre otro u otros por diferentes rutas y diferente cantidad de segmentos en cada ruta.

Los efectos directos son los más importantes ya que representan las regresiones entre los FM; sin embargo, se pueden presentar efectos indirectos tanto o más importantes que los indirectos. De igual manera, se puede identificar el tamaño de esos efectos, esta magnitud permite precisar la influencia de los FM de quienes se recibe el efecto.

Relaciones directas

Las relaciones que se confirman con el SEM corresponden a relaciones de causalidad, las cuales para los efectos directos corresponden a los coeficientes de ruta (CR). Estos CR se identifican con la letra griega β y corresponden a los factores de regresión entre los FM. Un coeficiente positivo representa una relación directa positiva, en términos generales, por cada unidad de cambio en el FM de origen implica una β unidad de cambio en el FM de llegada. El FM de origen es llamado predictor o regresor y el FM de llegada se denomina criterio. De otra parte, un coeficiente negativo representa una relación inversa, por cada unidad de cambio del FM de origen implica una β unidad de cambio inversa en el FM de llegada o criterio.

Para esta investigación, se confirma que las relaciones de causalidad entre los FM del modelo en todos los casos son positivas, ver Tabla 1, representadas por los β , lo que confirma relaciones directas y positivas entre ellos. Esta Tabla se lee así:

- En el cruce de las columnas con las filas se leen los coeficientes β que indican el efecto de las relaciones directas entre los FM. El FM independiente está ubicado en la columna y el FM dependiente está ubicado en la fila. La cantidad de β en la columna del FM independiente corresponde a la “fuerza” con que este factor influye en el FM dependiente.
- De igual manera, se pueden identificar más de un coeficiente β , uno por cada FM dependiente en el que el FM independiente influye. En la fila se ubican los factores dependientes. La cantidad de β_{ji} ubicados en la fila corresponde al número de FM independientes que influyen en el FM que nombra la fila.
- Los CR β_{ji} son los coeficientes con los que se construyen las ecuaciones estructurales.

De otra parte, el *software* dispone de información para verificar las pruebas de hipótesis. Para ejemplificar el análisis de esta prueba, se presenta a continuación la que corresponde a la relación directa entre compromiso de la alta dirección - CommTM. Se verifica que todas las relaciones directas en esta investigación son válidas.

A continuación, en la Tabla A4.5.1 se presentan las relaciones directas entre los FM. En este apartado se explican las relaciones directas para alta dirección – CommTM. Para las otras relaciones directas pueden ser consultadas en el Anexo A4.5 y sus ecuaciones se resumen aquí.

Tabla A4.5.1. Coeficientes de ruta β_{ji} . Efecto directo

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh	0.558						
TeamWork	0.506	0.324					
WorkEnv		0.468	0.295				
SupporOp	0.726	0.322		0.390			
SPImprov		0.159			0.650		
ProImpr			0.272		0.387	0.323	

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y1)

CommTM tiene relación directa con tres factores. Los procesos de apoyo son más dependientes de las políticas, estrategias y direccionamiento de la alta dirección, situación que verifica en el proceso de producción de proyectos de construcción y, en general, en el proceso de producción en cualquier sector.

El compromiso de la alta dirección tiene una relación directa y positiva sobre liderazgo Lean y, a través de este, influye indirectamente en cuatro de los FM que representan el 57.14% de los factores del modelo; estas relaciones también revisten de importancia en la evaluación de la madurez de LC como se verá más adelante. En la Tabla A4.5.2 se presentan las relaciones de este FM con los tres mencionados y la ecuación de la relación directa respectiva. A continuación, se explica, a manera de ejemplo, para los otros FM la forma en que se calculan los intervalos de confianza para CommTM (Y1) a TeamWork (Y3).

Tabla A4.5.2. Relación directa del FM compromiso de la alta dirección y los FM que impacta

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y ₁)		
CommTM (Y ₁) a TeamWork (Y ₃)	$Y_{31} = \beta_{31} Y_1$	$Y_{31} = 0.506 Y_1$
CommTM (Y ₁) a LeaderSh (Y ₂)	$Y_{21} = \beta_{21} Y_1$	$Y_{21} = 0.558 Y_1$
CommTM (Y ₁) a SupporOp (Y ₅)	$Y_{51} = \beta_{51} Y_1$	$Y_{51} = 0.726 Y_1$

CommTM (Y1) a TeamWork (Y3)

Este efecto se presenta por una ruta de un segmento, relación directa. Por cada unidad de cambio en CommTM se produce un cambio directo y positivo de 0.506 en TeamWork.

$$Y_{31} = \beta_{31} Y_1 \quad (9)$$

El error estándar permite construir los intervalos de confianza. Estos errores, se pueden ver en la Tabla A4.5.3, en la cual se muestran los errores para los coeficientes de ruta de las relaciones directas. Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los β_{ji} de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_{ji} \pm Z * \delta$$

Donde, δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$.

Para nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, se calcula el área de la distribución sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0.975$, se busca en la Tabla de probabilidades de la distribución normal estándar el valor de Z, el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es igual a 1.96.

$$\text{El límite superior del intervalo es: } LS = \beta_{ji} + 1.96 * \delta$$

$$\text{El límite inferior del intervalo es: } LI = \beta_{ji} - 1.96 * \delta$$

El error para la relación CommTM y TeamWork es $\delta = 0.17$, el intervalo de confianza es:

$$LS = 0.506 + 1.96 * 0.170 = 0.839$$

$$LI = 0.506 - 1.96 * 0.17 = 0.173$$

Entonces $0.173 \leq \beta_{31} \leq 0.839$

Tabla A4.5.3. Errores estándar para los coeficientes β_{ji} del modelo estructural

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh	0.086						
TeamWork	0.170	0.113					
WorkEnv		0.087	0.102				
SupporOp	0.076	0.130		0.102			
SPImprov		0.064			0.062		
ProImpr			0.084		0.114	0.081	

Influencia del liderazgo Lean - LeaderSh (Y2)

El liderazgo Lean (LeaderSh) tiene una relación directa con cuatro factores: TeamWork, WorkEnv, SupporOp y SPImprov. El liderazgo Lean es el factor que despliega los atributos de la alta dirección directamente en los factores que mueven la producción en la conformación de los equipos de trabajo y la creación y desarrollo de un ambiente de trabajo, en el desarrollo de los procesos que soportan la producción y la mejora del sistema de producción. Tabla A4.5.4.

Tabla A4.5.4. Relación directa del FM liderazgo Lean y los FM que impacta

Influencia del liderazgo Lean - LeaderSh (Y ₂)		
LeaderSh (Y ₂) a TeamWork (Y ₃)	$Y_{32} = \beta_{32} Y_2$	$Y_{32} = 0.324 Y_2$
LeaderSh (Y ₂) a WorkEnv (Y ₄)	$Y_{42} = \beta_{42} Y_2$	$Y_{42} = 0.468 Y_2$
LeaderSh (Y ₂) a SupporOp (Y ₅)	$Y_{52} = \beta_{52} Y_2$	$Y_{52} = 0.322 Y_2$
LeaderSh (Y ₂) a SPImprov (Y ₆)	$Y_{62} = \beta_{62} Y_2$	$Y_{62} = 0.159 Y_2$

Influencia del trabajo en equipo - TeamWork (Y₃)

El e de t trabajo en equipo (TeamWork) tiene una relación directa con dos factores. Con WorkEnv y ProImpr. Tabla A4.5.5.

Tabla A4.5.5. Relación directa del FM trabajo en equipo y los FM que impacta

Influencia del trabajo en equipo - TeamWork (Y ₃)		
TeamWork (Y ₃) a WorkEnv (Y ₄)	$Y_{43} = \beta_{43} Y_3$	$Y_{43} = 0.295 Y_3$
TeamWork (Y ₃) a ProImpr (Y ₇)	$Y_{73} = \beta_{73} Y_3$	$Y_{73} = \beta_{0.272} Y_3$

Influencia del ambiente de trabajo - WorkEnv (Y₄)

Un adecuado ambiente de trabajo contribuye con el buen desarrollo de los procesos de la organización que apoyan el flujo de las actividades del proyecto. Tabla A4.5.6.

Tabla A4.5.6. Relación directa del FM ambiente de trabajo y los FM que impacta

Influencia del ambiente de trabajo - WorkEnv (Y ₄)		
Ambiente de trabajo - WorkEnv (Y ₄)	$Y_{54} = \beta_{54} Y_4$	$Y_{54} = 0.390 Y_4$

Influencia del soporte operativo - SupporOp (Y₅)

El SupporOp tiene una relación directa con dos factores: SPImprov y ProImpr. Se confirma la importancia de estas relaciones en la producción misma, así como también la importancia de la sincronización de los atributos que definen el factor SupporOp para el mejor desempeño de la producción. Tabla A4.5.7.

Tabla A4.5.7. Relación directa del FM soporte operativo y los FM que impacta

Influencia del soporte operativo - SupporOp (Y ₅)		
SupporOp (Y ₅) a SPImprov (Y ₆)	$Y_{65} = \beta_{65} Y_5$	$Y_{65} = 0.650 Y_5$
SupporOp (Y ₅) a ProImpr (Y ₇)	$Y_{75} = \beta_{75} Y_5$	$Y_{75} = 0.387 Y_5$

Influencia del mejoramiento del sistema de producción – SPIImprov (Y_6)

El SPIImprov tiene relación directa de 0.323 con ProImpr (Y_7). El mejoramiento del sistema de producción busca la eliminación de todos aquellos elementos que se oponen al flujo de la producción, así como la aplicación de los principios LC que contribuyen al mejoramiento del sistema. Tabla A4.5.8.

Tabla A4.5.8. Relación directa del FM mejoramiento del sistema de producción y los FM que impacta

Influencia del mejoramiento del sistema de producción – SPIImprov (Y_6)		
Mejoramiento del sistema de producción – SPIImprov (Y_6)	$Y_{76} = \beta_{76} Y_6$	$Y_{76} = 0.323 Y_6$

Ensamble de las ecuaciones estructurales para efectos directos

Las ecuaciones estructurales son del tipo:

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i + \zeta$$

Donde:

Y_j : Factor de madurez

X_i : Atributo de madurez

β_{ij} : Coeficiente de ruta entre factores de madurez

λ_{ji} : Carga factorial del atributo de madurez

ζ_j : Error de estimación del factor

$\sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)}$: corresponde a los efectos de las rutas directas que llegan al factor j .

El error corresponde a la estimación de los efectos en el FM. Este error no se considera en razón a que hay suficiente información recolectada (Kline, 2011). Esto se fundamenta en que se requería una muestra mínima de noventa respuestas y se obtuvieron 111, en la medida en que la muestra aumenta, este error es más pequeño (García, 2011) encaminada a incrementar la disponibilidad de la maquinaria y equipo de producción y los beneficios económicos de las empresas. Sin embargo, no se conocen los factores administrativos que aseguren su éxito de implantación. En este artículo se presentan los resultados de una encuesta que constó de 20 ítems y fue aplicada a 203 gerentes y supervisores de mantenimiento de empresas localizadas en Ciudad Juárez, la cual debía ser respondida en una escala Likert. El cuestionario se validó mediante el índice Alfa de Cronbach, se aplicó un análisis factorial exploratorio (AFE). Así, las ecuaciones para cada FM con relación

a los efectos directos contienen el efecto de los atributos que lo explican y la influencia del o de los FM que lo impactan.

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i,$$

Donde Y_{j-1} son los factores de los cuales se recibe el efecto.

$$Y_2 = \beta_{21} Y_1 + \sum \lambda_{2i} X_i, \quad (9)$$

$$Y_3 = \beta_{31} Y_1 + \beta_{32} Y_2 + \sum \lambda_{3i} X_i, \quad (10)$$

$$Y_4 = \beta_{43} Y_3 + \beta_{42} Y_2 + \sum \lambda_{4i} X_i, \quad (11)$$

$$Y_5 = \beta_{51} Y_1 + \beta_{52} Y_2 + \beta_{54} Y_4 + \sum \lambda_{5i} X_i, \quad (12)$$

$$Y_6 = \beta_{62} Y_2 + \beta_{65} Y_5 + \sum \lambda_{6i} X_i, \quad (13)$$

$$Y_7 = \beta_{73} Y_3 + \beta_{75} Y_5 + \beta_{76} Y_6 + \sum \lambda_{7i} X_i, \quad (14)$$

Significancia de las relaciones directas

En este modelo, todas las relaciones directas son significativas, verificadas a través de los valores P de los coeficientes β mostrados en la Tabla A4.5.9. El valor P confirma que la relación es significativa y que la relación representada por la flecha es correcta, este es otro elemento confirmatorio del SEM.

Este modelo cuenta con trece relaciones directas, ocho de las trece relaciones con valor P menores a 0.001, y cinco de ellas con valor P entre 0.002 y 0.008, todas igualmente significativas para el estudio. La relación entre CommTM y TeamWork con 0.02, TeamWork y WorkEnv con 0.02, LeaderSh y TeamWork con 0.03, LeaderSh y SPImprov con valor P de 0.007 y LeaderSh y SupporOp con valor P de 0.008, ver Tabla A4.5.9. El valor P más alto corresponde a 0.008, lo que corresponde a una confiabilidad del 99.2%, un buen nivel de confianza de la relación directa entre estos dos factores.

Esto se debe al hecho de que los Valores P reflejan no solo la fuerza de la relación (que ya viene dada por el coeficiente de ruta en sí) sino también la potencia de la prueba, que aumenta con el tamaño de la muestra. Cuanto mayor sea el tamaño de la muestra, menor será el Valor de P para el Coeficiente de Ruta, es estadísticamente más significativo (Kock, 2017).

Tabla A4.5.9. Valor P de los coeficientes β_{ji} del modelo estructural (efecto directo)

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh	<0.001						
TeamWork	0.002	0.003					
WorkEnv		<0.001	0.002				
SupporOp	<0.001	0.008		<0.001			
SPImprov		0.007			<0.001		
ProImpr			<0.001		<0.001	<0.001	

Tamaño de los efectos directos para los factores de madurez

La contribución de los FM exógenos en el FM endógeno se expresa con el indicador R². El tamaño del efecto permite evaluar cómo el FM exógeno contribuye en la identificación del FM endógeno como una medida de relevancia predictiva. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo, o la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Este indicador refleja la bondad del ajuste del modelo para explicar la madurez.

En el modelo, este indicador se calcula para cada FM dependiente como un resultado del WarpPLS. Los tamaños de los efectos se leen en el cruce de la columna del FM independiente sobre el FM en el que produce el efecto como puede ser observado en la Tabla 4.20. La medida del efecto puede mostrar un efecto pequeño con 0.02, mediano para 0.15, o grande para 0.35. Sin embargo, esta escala recomendada por Kock (2017) no establece intervalos para el análisis, por lo cual para la investigación realizada se establecieron los siguientes intervalos: efectos pequeños entre (0.02, 0.15), efectos medianos entre [0.15, 0.35) y efectos grandes a partir del 0.35. Los efectos se describen a continuación de acuerdo con la Tabla A4.5.10.

Se presta particular atención a los efectos grandes (β_i); por medio de ellos se conforma la ruta crítica del modelo. En este caso, la ruta crítica corresponde a compromiso de la alta dirección (CommTM), soporte operativo (SupporOp), mejoramiento del sistema de producción (SPImprov) y mejoramiento de la producción (ProImpr), ver Figura A4.5.1.

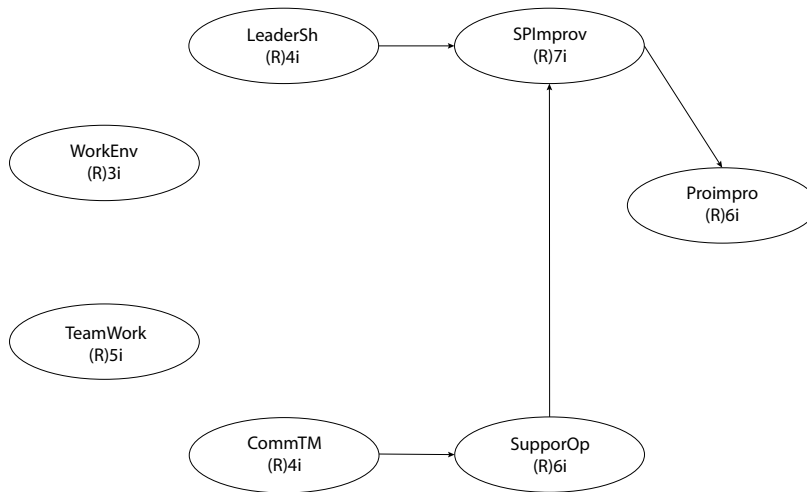


Figura A4.5.1. Ruta crítica de efectos del modelo. La ruta más influyente

- Efecto en liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)

LeaderSh recibe un solo efecto mediano del FM independiente CommTM. Este efecto corresponde a 31.1%, $R^2=0.311$. El CommTM influye directamente en LeaderSh lo que permite desplegar en el sistema de producción su influencia en factores que impactan la eficiencia de la producción.

- Efecto en trabajo en equipo – TeamWork (Y_3)

TeamWork recibe efectos de dos factores. Un efecto grande de CommTM con 0.345 y un efecto mediano de LeaderSh de 0.194. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 53.9%, $R^2=0.539$.

- Efecto en ambiente de trabajo – WorkEnv (Y_4)

WorkEnv recibe efecto de dos factores. Un efecto mediano de LeaderSh de 0.30 y un efecto mediano de TeamWork de 0.169. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 46.9%, $R^2=0.469$.

- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y_5)

SupporOp recibe efectos de tres factores. Un efecto mediano de WorkEnv de 0.225, el efecto grande de CommTM de 0.546 y el efecto pequeño de LeaderSh de 0.119. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 89.0%, $R^2=0.890$.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)

SPImprov recibe efectos de dos factores, uno pequeño de liderazgo Lean (LeaderSh) 0.063 considerado como importante en el estudio de las

relaciones del modelo, y otro de SupporOp con un efecto grande de 0.459. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 52.2%, $R^2=0.522$.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)

El mejoramiento de la producción (ProImpr) recibe los efectos de tres factores, todos ellos medianos. Trabajo en equipo (TeamWork) 0.172, soporte operativo (SupporOp) 0.294 y mejoramiento del sistema de producción (SPImprov) 0.240. Estos efectos sumados corresponden a la validez predictiva del factor en un 70.6%, $R^2=0.706$.

Tabla A4.5.10. Tamaño de los efectos (efecto directo)

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh	0.311							0.311
TeamWork	0.345	0.194						0.539
WorkEnv		0.300	0.169					0.469
SupporOp	0.546	0.119		0.225				0.890
SPImprov		0.063			0.459			0.522
ProImpr			0.172		0.294	0.240		0.706

La última columna corresponde a la suma de los efectos directos en el FM endógeno, este efecto total directo se confirma en la Figura 4.6 del Capítulo 4.

Los efectos de los factores independientes en los factores dependientes, en general, son grandes, en un rango que va desde el 31.1% al 89.0%. En todo el modelo, los efectos medianos corresponden al 53.85%, los efectos grandes al 38.46% y un efecto pequeño que corresponde el 7.69%.

Relaciones indirectas entre los factores de madurez

En ocasiones los efectos indirectos pueden llegar a ser más importantes que los efectos directos. Esto tiene que ver con que las variables mediadoras, o las que aparecen en el camino desde un FM exógeno hasta el endógeno, influyen en este efecto.

Los efectos en este modelo se presentan entre dos y seis segmentos, el número de segmentos depende de la cantidad de relaciones en el modelo que se requieran para llegar desde un FM exógeno al endógeno más alejado. A continuación, se realiza el análisis de las relaciones causales y los efectos indirectos para rutas de dos, tres, cuatro, cinco y seis segmentos. También se calculan los intervalos de confianza para las rutas con segmentos entre 2

y 6. En este Anexo 4.5 se presentan las tablas con los valores P y los errores estándar correspondientes con los cuales se apoyan los análisis de esta sección.

Los intervalos de confianza para las otras relaciones indirectas pueden ser consultados en el Anexo 4.5.

Efectos indirectos para rutas de dos segmentos y tamaños de los efectos

Este análisis detalla la relación causal en un FM endógeno a causa de uno o más FM exógenos ubicados dos segmentos atrás de él. En este anexo se describen las rutas en el modelo, Tabla A4.5.11.

Tabla A4.5.11. Número de rutas con dos segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	1						
WorkEnv	2	1					
SupporOp	1	1	1				
SPImprov	2	1		1			
ProImpr	2	3		1	1		

Para cada ruta de dos segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.12. De igual manera en el Anexo 4.5 se presentan estos efectos.

Tabla A4.5.12. Efectos indirectos de dos segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0.181						
WorkEnv	0.410	0.096					
SupporOp	0.179	0.183	0.115				
SPImprov	0.560	0.209		0.254			
ProImpr	0.419	0.264		0.151	0.210		

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y1)

El FM CommTM es el factor independiente en el modelo. Con rutas de dos segmentos, este factor tiene influencia en TeamWork, WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el FM que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño

de los efectos en cada FM endógeno. El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos identificados por β_{ji} presentes en las rutas. Son ocho rutas de dos segmentos por los cuales el FM CommTM (Y_1) influye en los otros.

- **CommTM (Y_1) a TeamWork (Y_3):** efecto en una ruta de dos segmentos.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{TeamWork} = 0.558 * 0.324 = 0.181$$

$$Y_{31} = \beta_{21} * \beta_{32} * Y_1 \quad (15)$$

El trabajo en equipo recibe influencia indirecta de CommTM, a través de LeaderSh. Como se vio en el análisis de las relaciones directas, el desarrollo del FM LeaderSh es muy importante, ya que es muy influyente en otros FM. En este caso, el trabajo en equipo requiere no solo del apoyo de CommTM de manera directa, sino que a través de LeaderSh ejerce influencia en este FM.

- **CommTM (Y_1) a WorkEnv (Y_4):** efecto en dos rutas de dos segmentos cada una.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{TeamWork} - \text{WorkEnv} = 0.506 * 0.295 = 0.149$$

$$\text{Ruta 2: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{WorkEnv} = 0.558 * 0.468 = 0.261$$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.410

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{42} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * Y_1 \quad (16)$$

El ambiente de trabajo recibe efecto de CommTM a través de TeamWork y LeaderSh. Siendo la ruta mediada por LeaderSh la que más influye en la construcción del ambiente de trabajo; esto no quiere decir que el equipo de trabajo no contribuya de manera importante con este ambiente. El efecto de ambas rutas de 0.410 es tan importante como el directo del factor LeaderSh 0.468.

- **CommTM (Y_1) a SupporOp (Y_5):** efecto en una ruta de dos segmentos.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{SupporOp} = 0.558 * 0.322 = 0.179$$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{52} * Y_1 \quad (17)$$

El SupporOp recibe el efecto indirecto de CommTM por medio de LeaderSh. Sigue siendo LeaderSh un factor por medio del cual CommTM impacta a otros factores de manera positiva.

- **CommTM (Y_1) a SPlmprov (Y_6):** efecto en dos rutas de dos segmentos cada una.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SPlmprov = $0.558 * 0.159 = 0.089$

Ruta 2: CommTM – SupporOp – SPlmprov = $0.726 * 0.650 = 0.472$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.561

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{62} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * Y_1 \quad (18)$$

El mejoramiento del sistema de producción se lleva a cabo de manera directa por LeaderSh y SupporOp. Por medio de estos factores, el CommTM influye indirecta y positivamente en SPlmprov. La ruta mediada por SupporOp es la que más influye en la mejora del sistema de producción, 0.472. La ruta mediada por LeaderSh no es muy influyente. Este modelo muestra que son los procesos de apoyo de la organización los que contribuyen al mejoramiento del sistema de producción con la disponibilidad de sistemas de información, operaciones logísticas, proceso de gestión contractual, implementación de un sistema de gestión y la gestión del conocimiento.

El efecto de ambas rutas en este FM es de 0.561. Este efecto es tan importante como el efecto directo del FM SupporOp de 0.650.

- **CommTM (Y_1) a ProImpr (Y_7):** efecto en dos rutas de dos segmentos cada una.

Ruta 1: CommTM – SupporOp – ProImpr = $0.726 * 0.387 = 0.281$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – ProImpr = $0.506 * 0.272 = 0.138$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.419

$$Y_{71} = \beta_{51} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{73} * Y_1 \quad (19)$$

El mejoramiento de la producción se lleva a cabo de manera directa por SupporOp y TeamWork, y es así que el CommTM influye indirecta y positivamente en SPlmprov a través de ellos. La ruta mediada por SupporOp es la que más influye en la mejora de la producción, 0.281. La ruta mediada por TeamWork es medianamente influyente, a pesar de que son los equipos de trabajo los responsables de la producción; sin embargo, se requiere de

los atributos del FM SupporOp para esta mejora de la producción, la cual es más influyente.

El efecto de ambas rutas es de 0.419, este es un efecto importante en estas relaciones.

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)

El FM LeaderSh tiene influencia por dos segmentos en cuatro FM: WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. El liderazgo Lean está influenciado directamente por el CommTM cuyas políticas y estrategias permiten el desarrollo de líderes a todos los niveles, a la vez este FM impacta en cuatro FM con la influencia de CommTM y los atributos directamente relacionados. Son seis rutas.

- **LeaderSh (Y_2) a WorkEnv (Y_4):** efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork – WorkEnv = $0.324 * 0.297 = 0.096$

$$Y_{42} = \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 \quad (20)$$

- **LeaderSh (Y_2) a SupporOp (Y_5):** efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv – SupporOp = $0.468 * 0.390 = 0.183$

$$Y_{52} = \beta_{42} * \beta_{54} * Y_2 \quad (21)$$

- **LeaderSh (Y_2) a SPImprov (Y_6):** efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp – SPImprov = $0.322 * 0.650 = 0.209$

$$Y_{62} = \beta_{52} * \beta_{65} * Y_2 \quad (22)$$

- **LeaderSh (Y_2) a ProImpr (Y_7):** Efecto en tres rutas de dos segmentos.

Ruta 1: LeaderSh – SPImprov – ProImpr = $0.159 * 0.323 = 0.051$

Ruta 2: LeaderSh – TeamWork – ProImpr = $0.324 * 0.272 = 0.088$

Ruta 3: LeaderSh – SupporOp – ProImpr = $0.322 * 0.387 = 0.125$

Efecto debido a las tres rutas es de: 0.264

$$Y_{72} = \beta_{62} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 + \beta_{52} * \beta_{75} * Y_2 \quad (23)$$

Influencia del trabajo en equipo – TeamWork (Y₃)

El TeamWork tiene influencia en el FM SupporOp, el cual es muy influyente desde los procesos de soporte de la organización en la producción misma. Esta influencia se refleja en una ruta. Es una ruta.

- **TeamWork (Y₃) a SupporOp (Y₅):**

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp = 0.295 * 0.390 = 0.115

$$Y_{53} = \beta_{43} * \beta_{54} * Y_3 \quad (24)$$

Influencia del ambiente de trabajo – WorkEnv (Y₄)

El FM WorkEnv tiene influencia por dos segmentos en dos FM: SPImprov y ProImpr. El efecto del ambiente de trabajo es importante para el desarrollo de estos dos FM, los cuales son los responsables de la eficiencia de la producción. Son dos rutas.

- **WorkEnv (Y₄) a SPImprov (Y₆):** efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov = 0.390 * 0.65 = 0.254

$$Y_{64} = \beta_{54} * \beta_{65} * Y_4 \quad (25)$$

- **WorkEnv (Y₄) a ProImpr (Y₇):** efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – ProImpr = 0.390 * 0.387 = 0.151

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{75} * Y_4 \quad (26)$$

Influencia del soporte operativo – SupporOp (Y₅)

El SupporOp influye indirectamente en ProImpr a través de SPImprov. El mejoramiento del sistema de producción tiene una alta influencia de los procesos de la organización que soportan la producción. Esta influencia se lleva a cabo por una ruta de dos segmentos.

- **SupporOp (Y₅) a ProImpr (Y₇):** efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: SupporOp – SPImprov – ProImpr = 0.650 * 0.323 = 0.210

$$Y_{75} = \beta_{65} * \beta_{76} * Y_5 \quad (27)$$

Tamaño de los efectos indirectos para dos segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho

factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. Estos tamaños en la Tabla A4.5.13.

Tabla A4.5.13. Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork	0.123							0.123
WorkEnv	0.207	0.062						0.269
SupporOp	0.135	0.067	0.053					0.255
SPImprov	0.334	0.082		0.090				0.506
ProImpr	0.317	0.145		0.089	0.160			0.711

Efecto en liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

LeaderSh no recibe efectos indirectos sólo recibe efectos directos como se presentó. No se presenta en la tabla.

- Efecto en trabajo en equipo – TeamWork (Y₃)

TeamWork recibe efecto de CommTM, su tamaño es de 0.123 que es un efecto pequeño; sin embargo, muestra su influencia indirecta en TeamWork. $R^2 = 0.123$

- Efecto en ambiente de trabajo – WorkEnv (Y₄)

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.207, que es un efecto mediano, y LeaderSh 0.062, un efecto pequeño, siendo más importante la influencia de CommTM en el WorkEnv. Sin embargo, el efecto combinado es de $R^2 = 0.269$ que configura un efecto mediano.

- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y₅)

SupporOp recibe efectos de TeamWork 0.053, que es un efecto pequeño, de CommTM 0.135 también un efecto pequeño y de LeaderSh 0.067, un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.255$ que corresponde a un efecto mediano. Son estos tres factores en conjunto que influyen en SupporOp con dos segmentos, lo que quiere decir que los factores mediadores

en cada uno de los casos son importantes de manera conjunta para el efecto en este factor.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)
SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.090, un efecto mediano de CommTM de 0.334 y uno pequeño de LeaderSh 0.082; sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.506$ que es un efecto grande de estos factores. Un efecto que es casi del mismo tamaño que el efecto directo que recibe, de 0.522, de SupporOp y LeaderSh que se explicó en el apartado del análisis del tamaño de los efectos directos.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)
ProImpr recibe un efecto pequeño de WorkEnv 0.089, un efecto mediano de CommTM 0.317, un efecto mediano de SupporOp 0.16 y un efecto pequeño de 0.145 de LeaderSh; aunque este último está muy cercano al límite de efecto grande, no debe ser subestimado, ya que estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.711$, un efecto mayor al efecto directo de los factores de los que recibe influencia.

Efectos indirectos para rutas de tres segmentos y tamaños de los efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados tres segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del Capítulo 4. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Tabla A4.5.14.

Tabla A4.5.14. Número de rutas de tres segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv	1						
SupporOp	2	1					
SPImprov	1	1	1				
ProImpr	4	2	1	1			

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.15.

Tabla A4.5.15. Efectos indirectos de tres segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv	0.053						
SupporOp	0.160	0.037					
SPImprov	0.117	0.119	0.075				
ProImpr	0.299	0.138	0.045	0.082			

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y_1)

Con rutas de tres segmentos, este factor tiene influencia en WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno. Son ocho rutas por las cuales este FM ejerce su influencia.

- **CommTM (Y_1) a WorkEnv (Y_4):** este efecto se presenta por una ruta de tres segmentos.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{TeamWork} - \text{WorkEnv} = 0.558 * 0.324 * 0.295 = 0.053$$

Efecto debido a esta ruta es de: 0.053

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * Y_1 \quad (28)$$

- **CommTM (Y_1) a SupporOp (Y_5):** este efecto se presenta por dos rutas.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{WorkEnv} - \text{SupporOp} = 0.558 * 0.468 * 0.39 = 0.102$$

$$\text{Ruta 2: CommTM} - \text{TeamWork} - \text{WorkEnv} - \text{SupporOp} = 0.506 * 0.295 * 0.39 = 0.058$$

Efecto de las dos rutas de tres segmentos: $0.102 + 0.058 = 0.160$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (29)$$

- **CommTM (Y_1) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov = 0.558 * 0.322 * 0.65 = 0.117

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * Y_1 \quad (30)$$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por cuatro rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SPImprov -ProImpr = 0.558 * 0.159 * 0.323 = 0.029

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – SupporOp -ProImpr = 0.558 * 0.322 * 0.387 = 0.070

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – TeamWork – ProImpr = 0.506 * 0.327 * 0.272 = 0.049

Ruta 4: CommTM – SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.726 * 0.650 * 0.323 = 0.152

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.299.

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{62} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{73} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (31)$$

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El factor LeaderSh tiene influencia por tres segmentos en tres factores: SupporOp, SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp = 0.324 * 0.295 * 0.390 = 0.037

$$Y_{52} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_2 \quad (32)$$

- **LeaderSh (Y₂) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – SPImprov = 0.468 * 0.39 * 0.650 = 0.119

$$Y_{62} = \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (33)$$

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp - SPImprov – ProImpr = 0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.068

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– ProImpr = 0.468 * 0.390 * 0.387 = 0.071

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.138.

$$Y_{72} = \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (34)$$

Influencia del trabajo en equipo – TeamWork (Y₃)

El TeamWork tiene influencia en los FM en SPImprov y ProImpr. Son dos rutas por las que este FM ejerce influencia.

- **TeamWork (Y₃) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov = 0.295 * 0.390 * 0.65 = 0.075

$$Y_{63} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_3 \quad (35)$$

- **TeamWork (Y₃) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – ProImpr = 0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.045

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_3 \quad (36)$$

Influencia del ambiente de trabajo – WorkEnv (Y₄)

El FM WorkEnv tiene influencia en ProImpr.

- **WorkEnv (Y₄) a ProImpr(Y₇):**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.082

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_4 \quad (37)$$

Tamaño de los efectos indirectos para tres segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor, y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se iden-

tifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A4.5.16.

Tabla A4.5.16. Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv	0.027							0.027
SupporOp	0.121	0.014						0.135
SPImprov	0.070	0.047	0.026					0.143
ProImpr	0.227	0.076	0.028	0.048				0.379

- Efecto en liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)
LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como se presentó.
- Efecto en ambiente de trabajo – WorkEnv (Y_4)
WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.027 que es un efecto pequeño. El efecto para tres segmentos es de $R^2 = 0.027$.
- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y_5)
SupporOp recibe efectos de CommTM 0.121, que es un efecto pequeño, y de LeaderSh 0.014, también un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.135$ que corresponde a un efecto pequeño.
- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)
SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.026, un efecto pequeño de CommTM de 0.070 y uno pequeño de LeaderSh 0.047; sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.143$ que es un efecto pequeño de estos factores.
- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)
ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.028, de WorkEnv, 0.048, un efecto mediano de CommTM, 0.227, y un efecto pequeño de

LeaderSh, 0.076. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.379$, un efecto grande.

Efectos Indirectos para rutas de cuatro segmentos y tamaño de los efectos
Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados cuatro segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del Capítulo 4. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Tabla A4.5.17.

Tabla A4.5.17. Número de rutas con cuatro segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp	1						
SPImprov	2	1					
ProImpr	3	2	1				

Para cada ruta de cuatro segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.18.

Tabla A4.5.18. Efectos indirectos de cuatro segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp	0.021						
SPImprov	0.104	0.024					
ProImpr	0.100	0.053	0.024				

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y_1)

Con rutas de cuatro segmentos, este factor tiene influencia en SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp =
 $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 = 0.021$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (38)$$

Esta relación se considera NO válida.

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp - SPImprov =
 $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.65 = 0.066$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv – SupporOp - SPImprov =
 $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.038$

El efecto combinado de las dos rutas es 0.104.

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (39)$$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov - ProImpr =
 $0.558 * 0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.038$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp -ProImpr =
 $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.023$

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – ProImpr =
 $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.387 = 0.039$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.100.

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 \quad (40)$$

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El factor LeaderSh tiene influencia por cuatro segmentos en dos factores: SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp – SPImprov =
0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 = 0.024

$$Y_{62} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (41)$$

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp - ProImpr =
0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.068

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– SPImprov - ProImpr = 0.468
* 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.014

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.053.

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (42)$$

Influencia del trabajo en equipo – TeamWork (Y₃)

El TeamWork tiene influencia en el factor en ProImpr.

- **TeamWork (Y₃) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr =
0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.024

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_3 \quad (43)$$

Tamaño de los efectos indirectos para cuatro segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá en la página siguiente (Tabla A4.5.19). En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh.

- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y₅)

SupporOp recibe un efecto pequeño de CommTM 0.016. R₂ = 0.016.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)
SPImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.062 y uno pequeño de LeaderSh 0.010; sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.072$ que es un efecto pequeño de estos factores.

Tabla A4.5.19. Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp	0.016							0.016
SPImprov	0.062	0.010						0.072
ProImpr	0.076	0.029	0.015					0.120

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)
ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.015, un efecto pequeño de CommTM 0.076 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.029. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R_2 = 0.120$, un efecto pequeño.

Efectos indirectos para rutas de cinco segmentos y tamaño de los efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados cinco segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del Capítulo 4. En este anexo se describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Tabla A4.5.20.

Tabla A4.5.20. Número de rutas con cinco segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp							
SPImprov	1						
ProImpr	3	1					

Para cada ruta de cinco segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.21.

Tabla A.4.5.21. Efectos indirectos de cinco segmentos

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp							
SPImprov	0.014						
ProImpr	0.042	0.008					

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y_1)

Con rutas de cinco segmentos, este FM tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el FM de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada FM endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y_1) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp - SPImprov = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.014$

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (44)$$

Esta relación se considera NO válida

- **CommTM (Y_1) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp - ProImpr = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.008$

Ruta 2: CommTM – LeaderSh - WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.021$

Ruta 3: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.012$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.042.

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (45)$$

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)

El factor LeaderSh tiene influencia por cinco segmentos en un factor: ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.008

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (46)$$

Tamaño de los efectos indirectos para cinco segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Tabla A4.5.222.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y₆)
SPImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.008. R² = 0.088 que es un efecto pequeño de estos factores.
- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y₇)
ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.017 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.004. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia pequeña sobre la producción de un R² = 0.036, un efecto pequeño.

Tabla A4.5.22. Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos.

	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp								
SPImprov	0.008							0.008
ProImpr	0.032	0.004						0.036

Efectos indirectos para rutas de seis segmentos y tamaño de los efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados seis segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del Capítulo 4. En este anexo se describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Solo se presenta un efecto para una ruta de seis segmentos desde CommTM a ProImpr, cuyo efecto indirecto es de 0.04 con un valor P de 0.063.

Influencia del compromiso de la alta dirección - CommTM (Y_1)

Con rutas de seis segmentos, este factor tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y_1) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.004$

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (47)$$

Esta relación se considera NO válida

Tamaño de los efectos indirectos para seis segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)

ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.003. Este factor de manera indirecta ejerce una influencia pequeña sobre la ProImpr de un $R^2 = 0.003$, es un efecto muy pequeño, no es importante.

Efectos totales y tamaño de los efectos

Corresponden a los efectos directos más los efectos indirectos. En la Tabla A4.5.23 se resumen los efectos entre los FM. Los directos analizados en el apartado 4.3.3.4, los efectos indirectos de todas las rutas agrupadas en cada interacción entre el FM independiente y el FM dependiente y la suma de ambos tipos de efectos.

Efectos indirectos pequeños

Corresponden a las relaciones entre LeaderSh y TeamWork 0.096, TeamWork y SPImprov de 0.075 y TeamWork y ProImpr demostrando que estos efectos no son muy importantes. El efecto entre TeamWork y SupporOp, aunque está en el rango de efectos pequeños, se muestra influyente en SupporOp.

Efectos medianos

CommTM y TeamWork con 0.181, LeaderSh y SupporOp con 0.220, WorkEnv y SPImprov con 0.254, WorkEnv y ProImpr con 0.233 y SupporOp y ProImpr con 0.210. Todos ellos medianos y cada vez más importantes para el desempeño del modelo.

Efectos grandes

El efecto del resto de relaciones es grande, por encima de 0.352 que corresponde a Leader y SPImprov. El efecto más grande se produce en la relación que hay entre CommTM y ProImpr de 0.864, efectos muy importantes para el desempeño del modelo.

Efectos moderadores

En este modelo no se presentan acciones para variables moderadoras

Tabla A4.5.23. Resumen de los efectos en el modelo

Efectos directos							
Factor Endogeno	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,506	0,324					
WorkEnv		0,468	0,295				
SupporOp	0,726	0,322		0,390			
SPImprov		0,159			0,650		
ProImpr			0,272		0,387	0,323	
Suma de los efectos indirectos							
Factor Endogeno	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0,181						
WorkEnv	0,464	0,096					
SupporOp	0,361	0,220	0,115				
SPImprov	0,795	0,352	0,075	0,254			
ProImpr	0,864	0,463	0,069	0,233	0,210		

Efectos totales							
Factor Endogeno	Comm TM	Leader Sh	Team Work	Work Env	Suppor Op	SP Improv	Pro Impr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,687	0,324					
WorkEnv	0,464	0,564	0,295				
SupporOp	1,087	0,542	0,115	0,390			
SPImprov	0,795	0,511	0,075	0,254	0,650		
ProImpr	0,864	0,463	0,341	0,233	0,597	0,323	

EFECTOS INDIRECTOS ENTRE LOS FACTORES DE MADUREZ

EFECTOS INDIRECTOS PARA RUTAS DE DOS SEGMENTOS

Este análisis detalla la relación causal en un FM endógeno a causa de dos FM exógenos ubicados dos segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del Capítulo 4. En este anexo se describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo.

Tabla A4.5A.1. Numero de pasos con dos segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork			1				
WorkEnv							
CommTM			2		1		
SupporOp	1		1	1			
LeaderSh							
SPImprov			1	2		1	
ProImpr		1	2	1	3		

Para cada ruta de dos segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.2. De igual manera se revisan los valores P para cada una de las relaciones de tal manera que con valores ≤ 0.01 se consideran las relaciones válidas. Tabla A4.5A.3.

Influencia del compromiso de la alta gerencia - CommTM (Y_1)

El factor CommTM es el factor independiente en el modelo. Con rutas de dos segmentos, este factor tiene influencia en TeamWork, WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y_1) a TeamWork (Y_3):** este efecto se presenta por una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh - TeamWork = $0.558 * 0.324 = 0.181$

$$Y_{31} = \beta_{21} * \beta_{32} * Y_1 \quad (14)$$

En la Tabla A4.5.A4 se muestran los errores para la relación indirecta de dos segmentos. El error para esta relación, $\delta = 0.007$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.181 + 1.96 * 0.007 = 0.318$$

$$LI = 0.181 - 1.96 * 0.007 = 0.044$$

Entonces $0.044 \leq \beta_{31} \leq 0.318$

El trabajo en equipo recibe influencia indirecta CommTM a través de LeaderSh. Como se vio en el análisis de las relaciones directas, el desarrollo del factor LeaderSh es muy importante, ya que es muy influyente en otros factores. En este caso, el trabajo en equipo requiere no solo del apoyo de CommTM de manera directa, sino que a través de LeaderSh ejerce influencia en este factor.

- **CommTM (Y_1) a WorkEnv (Y_4):** este efecto se presenta por dos rutas de dos segmentos cada una.

Ruta 1: CommTM – TeamWork – WorkEnv = $0.506 * 0.295 = 0.149$

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – WorkEnv = $0.558 * 0.468 = 0.261$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.410

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{42} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * Y_1 \quad (15)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.097$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.410 + 1.96 * 0.097 = 0.600$$

$$LI = 0.410 - 1.96 * 0.097 = 0.220$$

Entonces $0.220 \leq \beta_{41} \leq 0.600$

El ambiente de trabajo recibe efecto de CommTM a través de TeamWork y LeaderSh. Siendo la ruta mediada por LeaderSh la que más influye en la construcción del ambiente de trabajo; esto no quiere decir que el equipo de trabajo no contribuya de manera importante con este ambiente. El efecto de ambas rutas de 0.410 es tan importante como el directo del factor LeaderSh 0.468.

- **CommTM (Y_1) a SupporOp (Y_5):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp = $0.558 * 0.322 = 0.179$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{52} * Y_1 \tag{16}$$

El error para esta relación, $\delta = 0.078$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.179 + 1.96 * 0.078 = 0.332$$

$$LI = 0.179 - 1.96 * 0.078 = 0.026$$

Entonces $0.026 \leq \beta_{51} \leq 0.332$

El SupporOp recibe el efecto indirecto de CommTM por medio de LeaderSh. Sigue siendo LeaderSh un factor por medio del cual CommTM impacta a otros factores de manera positiva.

- **CommTM (Y_1) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SPImprov = $0.558 * 0.159 = 0.089$

Ruta 2: CommTM – SupporOp – SPImprov = $0.726 * 0.650 = 0.472$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.561.

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{62} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * Y_1 \tag{17}$$

El error para esta relación, $\delta = 0.085$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.561 + 1.96 * 0.085 = 0.728$$

$$LI = 0.561 - 1.96 * 0.085 = 0.394$$

Entonces $0.394 \leq \beta_{61} \leq 0.728$

El mejoramiento del sistema de producción se lleva a cabo de manera directa por LeaderSh y SupporOp. Por medio de estos factores, el CommTM influye indirecta y positivamente en SPIImprov. La ruta mediada por SupporOp es la que más influye en la mejora del sistema de producción, 0.472. La ruta mediada por LeaderSh no es muy influyente, ya que son los procesos de apoyo de la organización los que contribuyen al mejoramiento del sistema de producción con la disponibilidad de sistemas de información, operaciones logísticas, proceso de gestión contractual, implementación de un sistema de gestión y la gestión del conocimiento.

El efecto de ambas rutas es de 0.561, es tan importante como el directo del factor SupporOp de 0.650.

• **CommTM (Y_1) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – SupporOp – ProImpr = $0.726 * 0.387 = 0.281$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – ProImpr = $0.506 * 0.272 = 0.138$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.419.

$$Y_{71} = \beta_{51} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{73} * Y_1 \quad (18)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.091$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.419 + 1.96 * 0.091 = 0.597$$

$$LI = 0.419 - 1.96 * 0.091 = 0.240$$

Entonces $0.240 \leq \beta_{71} \leq 0.597$

El mejoramiento de la producción se lleva a cabo de manera directa por SupporOp y TeamWork, y es así que el CommTM influye indirecta y positivamente en SPIImprov a través de ellos. La ruta mediada por SupporOp es

la que más influye en la mejora de la producción, 0.281. La ruta mediada por TeamWork es medianamente influyente, a pesar de que son los equipos de trabajo los responsables de la producción; sin embargo, se requiere de los atributos del factor SupporOp para esta mejora de la producción.

El efecto de ambas rutas es de 0.419, un efecto importante en estas relaciones.

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El factor LeaderSh tiene influencia por dos segmentos en cuatro factores: WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. El liderazgo Lean está influenciado directamente por el CommTM cuyas políticas y estrategias permiten el desarrollo de líderes a todos los niveles.

- **LeaderSh (Y₂) a WorkEnv (Y₄):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork – WorkEnv = 0.324 * 0.297 = 0.096

$$Y_{42} = \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 \quad (19)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.039$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.096 + 1.96 * 0.039 = 0.172$$

$$LI = 0.096 - 1.96 * 0.039 = 0.0196$$

Entonces $0.0196 \leq \beta_{42} \leq 0.172$

- **LeaderSh (Y₂) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv – SupporOp = 0.468 * 0.390 = 0.183

$$Y_{52} = \beta_{42} * \beta_{54} * Y_2 \quad (20)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.058$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.183 + 1.96 * 0.058 = 0.297$$

$$LI = 0.183 - 1.96 * 0.058 = 0.069$$

Entonces $0.069 \leq \beta_{52} \leq 0.297$

- **LeaderSh (Y_2) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp – SPImprov = $0.322 * 0.650 = 0.209$

$$Y_{62} = \beta_{52} * \beta_{65} * Y_2 \quad (21)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.009$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.209 + 1.96 * 0.009 = 0.227$$

$$LI = 0.209 - 1.96 * 0.009 = 0.191$$

Entonces $0.191 \leq \beta_{62} \leq 0.227$

- **LeaderSh (Y_2) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: LeaderSh – SPImprov – ProImpr = $0.159 * 0.323 = 0.051$

Ruta 2: LeaderSh – TeamWork – ProImpr = $0.324 * 0.272 = 0.088$

Ruta 3: LeaderSh – SupporOp – ProImpr = $0.322 * 0.387 = 0.125$

Efecto debido a las tres rutas es de: 0.264.

$$Y_{72} = \beta_{62} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 + \beta_{52} * \beta_{75} * Y_2 \quad (22)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.067$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.264 + 1.96 * 0.067 = 0.395$$

$$LI = 0.264 - 1.96 * 0.067 = 0.133$$

Entonces $0.133 \leq \beta_{72} \leq 0.395$

Influencia del trabajo en equipo – TeamWork (Y_3)

El TeamWork tiene influencia en un factor en SupporOp, el cual es muy influyente desde los procesos de soporte de la organización en la producción. Esta influencia se refleja en una ruta.

- **TeamWork (Y_3) a SupporOp (Y_5):**

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp = $0.295 * 0.390 = 0.115$

$$Y_{53} = \beta_{43} * \beta_{54} * Y_3 \quad (23)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.047$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.115 + 1.96 * 0.047 = 0.207$$

$$LI = 0.115 - 1.96 * 0.047 = 0.023$$

Entonces $0.023 \leq \beta_{53} \leq 0.207$

Influencia del ambiente de trabajo – WorkEnv (Y_4)

El factor WorkEnv tiene influencia por dos segmentos en dos factores: SPImprov y ProImpr. El efecto del ambiente de trabajo es importante en para el desarrollo de estos dos factores, los cuales son los responsables de la eficiencia de la producción.

- **WorkEnv (Y_4) a SPImprov(Y_6):**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov = $0.390 * 0.65 = 0.254$

$$Y_{64} = \beta_{54} * \beta_{65} * Y_4 \quad (24)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.071$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.254 + 1.96 * 0.071 = 0.393$$

$$LI = 0.254 - 1.96 * 0.071 = 0.115$$

Entonces $0.115 \leq \beta_{64} \leq 0.393$

- **WorkEnv (Y_4) a ProImpr(Y_7):**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – ProImpr = $0.390 * 0.387 = 0.151$

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (25)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.059$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.151 + 1.96 * 0.059 = 0.267$$

$$LI = 0.151 - 1.96 * 0.059 = 0.035$$

Entonces $0.035 \leq \beta_{74} \leq 0.267$

Influencia del soporte operativo – SupporOp (Y_5)

El SupporOp influye indirectamente en ProImpr a través de SPImprov. Es el mejoramiento del sistema de producción con una alta influencia de los procesos de la organización que soportan la producción. Esta influencia se lleva a cabo por una ruta de dos segmentos.

- SupporOp (Y_5) a ProImpr (Y_7):

Ruta 1: SupporOp – SPImprov – ProImpr = $0.650 * 0.323 = 0.210$

$$Y_{75} = \beta_{65} * \beta_{76} * Y_5 \quad (26)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.054$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.210 + 1.96 * 0.054 = 0.316$$

$$LI = 0.210 - 1.96 * 0.054 = 0.104$$

Entonces $0.104 \leq \beta_{75} \leq 0.316$

Tabla A4.5A.2. Efectos indirectos de dos segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork			0.181				
WorkEnv			0.410		0.096		
CommTM							
SupporOp	0.015		0.179		0.183		
LeaderSh							
SPImprov		0.254	0.561		0.209		
ProImpr		0.151	0.419	0.210	0.264		

Tabla A4.5A.3 Valores P para los efectos indirectos de dos segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork			0.006				
WorkEnv			<0.001		0.007		
CommTM							
SupporOp	0.008		0.011		0.001		

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
LeaderSh							
SPIimprov		<0.001	<0.001		0.009		
ProImpr		0.006	<0.001	<0.001	<0.001		

Tabla A4.5A.4. Errores estándar para efectos indirectos de dos segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork			0.070				
WorkEnv				0.097	0.039		
CommTM							
SupporOp	0.047		0.078		0.058		
LeaderSh							
SPIimprov		0.071	0.085		0.009		
ProImpr		0.059	0.091	0.054	0.067		

Tamaño de los efectos indirectos para dos segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPIimprov, casi tan grande como el efecto directo, y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. Ver Tabla A4.5A.5.

- Efecto en liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)

LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como ya se presentó.

- Efecto en trabajo en equipo – TeamWork (Y_3)

TeamWork recibe efecto de CommTM, su tamaño es de 0.123 que es un efecto pequeño; sin embargo, muestra su influencia indirecta en TeamWork. $R^2 = 0.123$

- Efecto en ambiente de trabajo – WorkEnv (Y_4)

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.207 que es un efecto mediano y LeaderSh 0.062 un efecto pequeño, siendo más importante la influencia de

CommTM en el WorkEnv. Sin embargo, el efecto combinado es de $R_2 = 0.269$ que configura un efecto mediano.

- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y_5)

SupporOp recibe efectos de TeamWork 0.053, que es un efecto pequeño; de CommTM 0.135, también un efecto pequeño y de LeaderSh 0.067, un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.255$ que corresponde a un efecto mediano. Son estos tres factores en conjunto que influyen en SupporOp con dos segmentos; lo que quiere decir que los factores mediadores en cada uno de los casos son importantes de manera conjunta para el efecto en este factor.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)

SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.090. Un efecto mediano de CommTM de 0.334, y uno pequeño de LeaderSh 0.082; sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.506$ que es un efecto grande de estos factores. Un efecto que es casi del mismo tamaño que el efecto directo que recibe de 0.522 que recibe de SupporOp y LeaderSh que se explicó en el apartado del análisis del tamaño de los efectos directos.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)

ProImpr recibe un efecto pequeño de WorkEnv 0.089, un efecto mediano de CommTM 0.317, un efecto mediano de SupporOp 0.16 y un efecto pequeño de 0.145 de LeaderSh; aunque este último está muy cercano al límite de efecto grande no debe ser subestimado, ya que estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.711$, un efecto mayor al efecto directo de los factores de los que recibe influencia.

Tabla A4.5A.5. Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr	Efecto 2 seg.
TeamWork			0.123					0.123
WorkEnv			0.207	0.062				0.269
CommTM								
SupporOp	0.053		0.0135	0.067				0.255
LeaderSh								
SPImprov			0.090	0.034		0.082		0.506
ProImpr		0.089	0.317	0.160	0.145			0.711

Efectos indirectos para rutas de tres segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de tres FM exógenos ubicados tres segmentos atrás de él. Se identifica el total de rutas de tres segmentos. Tabla A4.5A.6.

Tabla A4.5A.6. Numero de pasos con tres segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv			1				
CommTM							
SupporOp			2	1			
LeaderSh							
SPImprov	1		1	1			
ProImpr		1	1	4			2

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.7. Los valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.8 y los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.9.

Influencia del compromiso de la alta gerencia - CommTM (Y_1)

Con rutas de tres segmentos, este factor tiene influencia en WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y_1) a WorkEnv (Y_4):** este efecto se presenta por una ruta de tres segmentos.

$$\text{Ruta 1: } \text{CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{TeamWork} - \text{WorkEnv} = 0.558 * 0.324 * 0.295 = 0.053$$

Efecto debido a esta ruta es de: 0.053.

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * Y_1 \quad (26)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.025$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.053 + 1.96 * 0.025 = 0.102$$

$$LI = 0.053 - 1.96 * 0.025 = 0.004$$

Entonces $0.004 \leq \beta_{41} \leq 0.102$

- **CommTM (Y_1) a SupporOp (Y_5):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp = $0.558 * 0.468 * 0.39 = 0.102$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp = $0.506 * 0.295 * 0.39 = 0.058$

Efecto de las dos rutas de tres segmentos: $0.102 + 0.058 = 0.160$.

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (27)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.055$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.160 + 1.96 * 0.055 = 0.268$$

$$LI = 0.160 - 1.96 * 0.055 = 0.052$$

Entonces $0.052 \leq \beta_{51} \leq 0.268$

- **CommTM (Y_1) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov = $0.558 * 0.322 * 0.65 = 0.117$

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * Y_1 \quad (28)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.051$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.117 + 1.96 * 0.051 = 0.217$$

$$LI = 0.117 - 1.96 * 0.051 = 0.017$$

Entonces $0.017 \leq \beta_{61} \leq 0.217$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por cuatro rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SPImprov -ProImpr = 0.558 * 0.159 * 0.323 = 0.029

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – SupporOp -ProImpr = 0.558 * 0.322 * 0.387 = 0.070

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – TeamWork – ProImpr = 0.506 * 0.327 * 0.272 = 0.049

Ruta 4: CommTM – SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.726 * 0.650 * 0.323 = 0.152

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.299.

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{62} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{73} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (29)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.064$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.299 + 1.96 * 0.064 = 0.424$$

$$LI = 0.299 - 1.96 * 0.064 = 0.174$$

Entonces $0.174 \leq \beta_{71} \leq 0.424$

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El factor LeaderSh tiene influencia por tres segmentos en tres factores: SupporOp, SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp = 0.324 * 0.295 * 0.390 = 0.037

$$Y_{52} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_2 \quad (30)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.018$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.037 + 1.96 * 0.018 = 0.072$$

$$LI = 0.037 - 1.96 * 0.018 = 0.00172$$

Entonces $0.00172 \leq \beta_{52} \leq 0.072$

• **LeaderSh (Y_2) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – SPImprov = $0.468 * 0.39 * 0.650 = 0.119$

$$Y_{62} = \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (31)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.040$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.119 + 1.96 * 0.040 = 0.197$$

$$LI = 0.119 - 1.96 * 0.040 = 0.041$$

Entonces $0.041 \leq \beta_{62} \leq 0.197$

• **LeaderSh (Y_2) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp - SPImprov – ProImpr = $0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.068$

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– ProImpr = $0.468 * 0.390 * 0.387 = 0.071$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.138.

$$Y_{72} = \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (32)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.047$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.138 + 1.96 * 0.047 = 0.230$$

$$LI = 0.138 - 1.96 * 0.047 = 0.045$$

Entonces $0.045 \leq \beta_{72} \leq 0.230$

Influencia del trabajo en equipo – TeamWork (Y_3)

El TeamWork tiene influencia en un factor en SPImprov y ProImpr.

- **TeamWork (Y₃) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.
Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov = 0.295 * 0.390 * 0.65 = 0.075

$$Y_{63} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_3 \quad (33)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.032$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.075 + 1.96 * 0.032 = 0.138$$

$$LI = 0.075 - 1.96 * 0.032 = 0.012$$

Entonces $0.012 \leq \beta_{63} \leq 0.138$

- **TeamWork (Y₃) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.
Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – ProImpr = 0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.045

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_3 \quad (34)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.022$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.045 + 1.96 * 0.022 = 0.088$$

$$LI = 0.045 - 1.96 * 0.022 = 0.00188$$

Entonces $0.00188 \leq \beta_{73} \leq 0.088$

Influencia del ambiente de trabajo – WorkEnv (Y₄)

El factor WorkEnv tiene influencia en ProImpr.

- **WorkEnv (Y₄) a ProImpr(Y₇):**
Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.082

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_4 \quad (35)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.030$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.082 + 1.96 * 0.030 = 0.141$$

$$LI = 0.082 - 1.96 * 0.030 = 0.023$$

Entonces $0.023 \leq \beta_{74} \leq 0.141$

Tabla A4.5A.7. Efectos indirectos de tres segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv				0.053			
CommTM							
SupporOp			0.160	0.037			
LeaderSh							
SPImprov	0.075		0.117	0.199			
ProImpr		0.045	0.082	0.299	0.138		

Tabla A4.5A.8. Valores P para los efectos indirectos de tres segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv				0.019			
CommTM							
SupporOp			0.002	0.022			
LeaderSh							
SPImprov	0.010		0.012		0.002		
ProImpr		0.023	0.003	<0.001		0.002	

Tabla A4.5A.9. Errores estándar para efectos indirectos de tres segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv			0.025				
CommTM							
SupporOp		0.055		0.018			
LeaderSh							
SPImprov	0.032		0.051		0.040		
ProImpr		0.0232	0.030	0.064	0.047		

Tamaño de los efectos indirectos para tres segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov, casi tan grande como el efecto directo, y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A4.5A.10.

- Efecto en liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)

LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como ya se presentó.

- Efecto en ambiente de trabajo – WorkEnv (Y_4)

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.027 que es un efecto pequeño. El efecto para tres segmentos es de $R^2 = 0.027$.

- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y_5)

SupporOp recibe efectos de CommTM 0.121 que es un efecto pequeño y de LeaderSh 0.014, también un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.135$ que corresponde a un efecto pequeño.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)

SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.026. Un efecto pequeño de CommTM de 0.070 y uno pequeño de LeaderSh 0.047; sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.143$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)

ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.028; de WorkEnv, 0.048; un efecto mediano de CommTM, 0.227, y un efecto pequeño de LeaderSh, 0.076. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.379$, un efecto grande.

Tabla A4.5A.10. Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Support Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr	Efecto 3 seg.
TeamWork								
WorkEnv				0.027				0.027
CommTM								
SupportOp		0.121		0.014				0.135
LeaderSh								
SPImprov	0.026		0.070		0.047			0.143
ProImpr		0.028	0.048	0.227	0.076			0.379

Efectos indirectos para rutas de cuatro segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de tres FM exógenos ubicados cuatro segmentos atrás de él. Se identifica el total de rutas de cuatro segmentos. Tabla A4.5A.11.

Tabla A4.5A.11. Número de pasos con cuatro segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Support Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupportOp			1				
LeaderSh							
SPImprov		2		1			
ProImpr		1	3	2			

Para cada ruta de cuatro segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.12. Los valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.13 y los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.14.

Influencia del Compromiso de la Alta Gerencia - CommTM (Y_1)

Con rutas de cuatro segmentos, este factor tiene influencia en SupportOp, SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y_1) a SupportOp (Y_3):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp =
 $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 = 0.021$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (36)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.012$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.021 + 1.96 * 0.012 = 0.045$$

$$LI = 0.021 - 1.96 * 0.012 = -0.00252$$

Entonces $-0.00252 \leq \beta_{51} \leq 0.045$

Esta relación se considera NO válida.

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp - SPImprov =
 $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.65 = 0.066$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv – SupporOp - SPImprov =
 $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.038$

El efecto combinado de las dos rutas es 0.104

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (37)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.038$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.104 + 1.96 * 0.038 = 0.178$$

$$LI = 0.104 - 1.96 * 0.038 = 0.0295$$

Entonces $0.0295 \leq \beta_{61} \leq 0.178$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov - ProImpr =
 $0.558 * 0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.038$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp -ProImpr =
 $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.023$

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – ProImpr =
 $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.387 = 0.039$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.100

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 \quad (38)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.036$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.100 + 1.96 * 0.036 = 0.171$$

$$LI = 0.100 - 1.96 * 0.036 = 0.029$$

Entonces $0.029 \leq \beta_{71} \leq 0.171$

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y_2)

El factor LeaderSh tiene influencia por cuatro segmentos en dos factores: SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y_2) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp – SPImprov =
 $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 = 0.024$

$$Y_{62} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (39)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.012$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.024 + 1.96 * 0.012 = 0.0478$$

$$LI = 0.024 - 1.96 * 0.012 = 0.00048$$

Entonces $0.00048 \leq \beta_{62} \leq 0.0475$

- **LeaderSh (Y_2) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp - ProImpr =
 $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.068$

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– SPImprov - ProImpr = $0.468 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.014$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.053.

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (40)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.017$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.053 + 1.96 * 0.017 = 0.086$$

$$LI = 0.053 - 1.96 * 0.017 = 0.0197$$

Entonces $0.0197 \leq \beta_{72} \leq 0.086$

- Influencia del trabajo en equipo – TeamWork (Y_3)
El TeamWork tiene influencia en el factor en ProImpr.

- **TeamWork (Y_3) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por una ruta.
Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.024$

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_3 \quad (41)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.012$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.024 + 1.96 * 0.012 = 0.0475$$

$$LI = 0.024 - 1.96 * 0.012 = 0.00048$$

Entonces $0.00048 \leq \beta_{73} \leq 0.0475$

Tabla A4.5A.12. Efectos indirectos de cuatro segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp			0.021				
LeaderSh							
SPImprov		0.104		0.024			
ProImpr	0.024		0.100	0.053			

Tabla A4.5A.13. Valores P para los efectos indirectos de cuatro segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp			0.040				
LeaderSh							
SPIimprov			0.004	0.021			
ProImpr	0.025	0.003	0.002				

Tabla A.4.5A.14. Errores estándar para efectos indirectos de cuatro segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp		0.012					
LeaderSh							
SPIimprov			0.038	0.012			
ProImpr	0.012	0.036		0.017			

Tamaño de los efectos indirectos para cuatro segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPIimprov, casi tan grande como el efecto directo, y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A.4.5A.15.

- Efecto en soporte operativo – SupporOp (Y_5)
SupporOp recibe un efecto pequeño de CommTM 0.016. $R^2 = 0.016$.
- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPIimprov (Y_6)
SPIimprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.062 y uno pequeño de LeaderSh 0.010; sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.072$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)

ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.015, un efecto pequeño de CommTM 0.076 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.029. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.120$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5A.15. Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr	Efecto 4 seg.
TeamWork								
WorkEnv								
CommTM								
SupporOp			0.016					0.016
LeaderSh								
SPImprov			0.062		0.010			0.072
ProImpr		0.015	0.076		0.029			0.120

Efectos indirectos para rutas de cinco segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de tres FM exógenos ubicados cinco segmentos atrás de él. Se identifica el total de rutas de cinco segmentos. Tabla A4.5A.16.

Para cada ruta de cinco segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.17 a continuación. Los valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.18 y los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.19.

Tabla A4.5A.16. Numero de pasos con cinco segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov			1				
ProImpr		3		1			

Influencia del compromiso de la alta gerencia - CommTM (Y_1)

Con rutas de cinco segmentos, este factor tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de

madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y_1) a SPImprov (Y_6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.014$

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (42)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.008$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.014 + 1.96 * 0.008 = 0.0296$$

$$LI = 0.014 - 1.96 * 0.008 = -0.00168$$

Esta relación se considera NO válida.

- **CommTM (Y_1) a ProImpr (Y_7):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv – SupporOp – ProImpr = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.008$

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – WorkEnv – SupporOp – SPImprov – ProImpr = $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.021$

Ruta 3: CommTM – TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov – ProImpr = $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.012$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.042.

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (43)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.017$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.042 + 1.96 * 0.017 = 0.075$$

$$LI = 0.042 - 1.96 * 0.017 = 0.00868$$

Entonces $0.0868 \leq \beta_{71} \leq 0.075$

Influencia del liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El factor LeaderSh tiene influencia por cinco segmentos en un factor: ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.008

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \tag{44}$$

El error para esta relación, $\delta = 0.004$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.008 + 1.96 * 0.004 = 0.0158$$

$$LI = 0.008 - 1.96 * 0.004 = 0.00016$$

Entonces $0.00016 \leq \beta_{72} \leq 0.0158$

Tabla A4.5A.17. Efectos indirectos de cinco segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov		0.140					
ProImpr			0.042	0.008			

Tabla A4.5A.18. Valores P para los efectos indirectos de cinco segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov			0.038				
ProImpr			0.007	0.034			

Tabla A4.5A.19. Errores estándar para efectos indirectos de cinco segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov			0.008				
ProImpr			0.017	0.004			

Tamaño de los efectos indirectos para cinco segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Tabla A4.5A.20.

- Efecto en mejoramiento del sistema de producción – SPImprov (Y_6)
SPImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.008. $R^2 = 0.088$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)
ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.017 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.004. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia pequeña sobre la producción de un $R^2 = 0.036$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5A.20. Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr	Efecto 5 seg.
TeamWork								
WorkEnv								
CommTM								
SupporOp								
LeaderSh								
SPImprov			0.008					0.008
ProImpr		0.032		0.004				0.036

Efectos indirectos para rutas de seis segmentos

Solo se dispone de una ruta con seis segmentos. Tabla A4.5A.21.

Tabla A4.5A.21. Numero de pasos con seis segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
ProImpr			1				

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.22. Los valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.23 y los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.24.

Influencia del compromiso de la alta gerencia - CommTM (Y1)

Con rutas de cinco segmentos, este factor tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este apartado se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.004

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (43)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.003$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.004 + 1.96 * 0.003 = 0.00988$$

$$LI = 0.004 - 1.96 * 0.003 = -0.00188$$

Esta relación se considera NO válida.

Tabla A4.5A.22. Efectos indirectos de seis segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov							
ProImpr		0.004					

Tabla A4.5A.23. Valores P para los efectos indirectos de seis segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov							
ProImpr		0.063					

Tabla A4.5A.24. Errores estándar para efectos indirectos de seis segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Suppor Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov							
ProImpr		0.003					

Tamaño de los efectos indirectos para seis segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis se identifican efectos indirectos ver Tabla A4.5A.25.

- Efecto en mejoramiento de la producción – ProImpr (Y_7)

ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.003. Este factor de manera indirecta ejerce una influencia pequeña sobre la producción de un $R^2 = 0.003$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5A.25. Tamaño de los efectos indirectos de seis segmentos

	Team Work	Work Env	Comm TM	Support Op	Leader Sh	SP Improv	Pro Impr	Efecto 6 seg.
ProImpr			0.003					0.003

Lean en la construcción, Lean Constuction (LC), fue propuesta por el profesor Lauri Koskela en 1992, como resultado de su estudio del Sistema de Producción Toyota y su potencial de aplicación en la construcción. Lean Construction surge como una filosofía para la gestión y la práctica de construcción, se propone como un sistema de gestión de producción de proyectos de construcción que propende por la mejora de la eficiencia en ellos. La implementación de LC se viene llevando a cabo en empresas constructoras alrededor del mundo, sin embargo, es importante conocer el nivel de madurez de la implementación de LC y proponer mejoras para evolucionar hacia estados superiores de madurez. *El Modelo sistémico de evolución de Lean Construction, SLC-EModel*, se presenta como una herramienta original con la que se evalúa el nivel de madurez de la implementación de LC y permite identificar una ruta de evolución de acuerdo con las capacidades de la organización para la gestión del proyecto de construcción.

El propósito de la investigación es entregar a la industria de la construcción una herramienta útil y validada, que evalúe el nivel de madurez de LC en la gestión de producción de proyectos de construcción y que oriente con precisión las acciones necesarias para alcanzar un mayor nivel de madurez LC para evolucionar. En la medida en que se alcanzan mayores niveles de madurez, se mejora la producción del proyecto de construcción y por tanto, la productividad empresarial y como consecuencia de esto, la productividad del sector se ve impactada positivamente.

La evolución implica intervenir el sistema de producción de proyectos de (GPC) construcción para mejorar su eficiencia para el cumplimiento de la oferta de valor de manera continua. Para cumplir con el propósito mencionado, se diseña un modelo de evolución de LC en la GPC, se caracteriza la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean, se escogen los elementos involucrados en la madurez y se identifican las relaciones entre ellos para estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC, y se desarrolla una herramienta de evaluación de madurez de LC en la GPC que permita conocer el nivel actual de madurez para orientar su evolución hacia niveles superiores.

